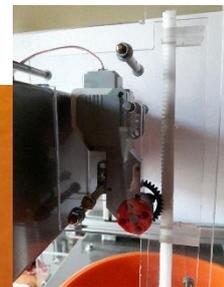
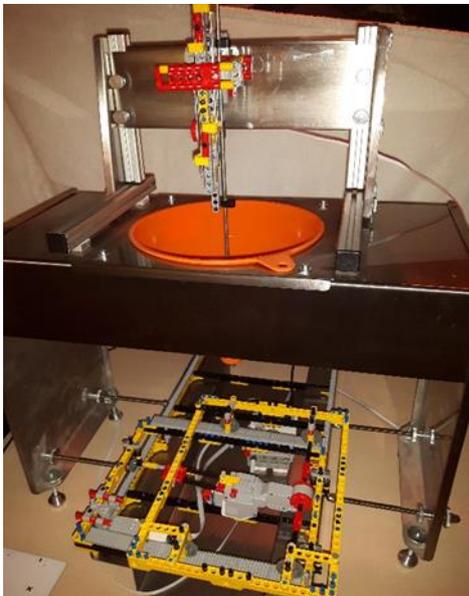


„Schüler experimentieren“-Projekt

Perfekte Macarons 2.0

Robin Luca Wolff (14 Jahre)

9d, Erzbischöfliches St. Angela-Gymnasium, Wipperfürth



Zusammenfassung

In meinem diesjährigen Projekt entwickelte ich den Macaronteigspeiser des letzten Jahres weiter. Es gab drei Ansatzpunkte: Erst musste die im Wettbewerb zu instabile Lego-Konstruktion von XY-Tisch und Teigspeiser durch ein stabileres, aber für mich gut zu bearbeitendes Material ersetzt werden. Da die aktiven Lego-Teile (Steuerung) prima funktioniert hatten, habe ich nur die passiven Teile (Rahmen) ersetzt. Im zweiten Ansatz konstruierte ich einen zweiten Speiserweg, um die Macarons auch automatisiert füllen zu können. Weil das beim Umbau gut geklappt hatte, habe ich dabei direkt mit Polystyrol gearbeitet. Der dritte Ansatz war die Idee, noch eine Backstation anzuschließen.

Ich habe die Dosiergenauigkeit des Geräts mit statistischen Methoden, im Vergleich zu den Ergebnissen des letzten Jahres, überprüft. Das optimierte Gerät ist viel stabiler und weniger fehleranfällig, bei deutlich verbesserten Dosiergenauigkeiten beider Speiser. Nur an der Idee mit der Backstation muss ich noch arbeiten.

Inhalt

Einführung	3
Recherche-Ergebnisse	3
Konstruktionsmaterial.....	3
Fügetechniken Polystyrol	4
Druck- oder Quetschspeiser	5
Projektplanung	5
Mögliche Fehlerquellen und ihre Bedeutung.....	6
Maschinenbau & Justage	6
Fügeversuche Polystyrol	6
Umbau des XY-Tisches.....	8
Umbau des Teigspeisers	11
Konstruktion des Füllungsspeiser	12
Erste Versuche zu einer Backstation.....	13
Programmentwicklung & Synchronisation	14
Durchführung Geräteprüfung.....	15
Ergebnisse & Diskussion	16
Quellenangaben.....	18

Einführung

In meinem Projekt des letzten Jahrs [1], „Perfekte Macarons – Handwerk oder Technik?“, hatte ich einen Macaronteig-Speiser mit einem XY-Tisch entwickelt, die hauptsächlich aus Lego-Konstruktion und Lego-Automation bestanden. Aus den Gesprächen mit den Juroren und Besuchern aus den Regional- und Landeswettbewerben habe ich einige Anregungen zu Verbesserungen für das Gerät mitgenommen. Außerdem hatte ich ohnehin noch eigene Ideen zur Erweiterung, um vielleicht ganz automatisiert Macarons damit backen zu können.

Die Rahmen des verfahrbaren XY-Tisches und die Halterung der Speisernadel mit Motor waren aus Lego-Technik gebaut und daher zwar flexibel in der Konstruktionsphase, aber nicht stabil genug für den Wettbewerb. Das Titelbild zeigt auf der linken Seite das Vorjahresgerät.

Ich bekam auch den Hinweis, besser mit einem Material zu arbeiten, dass ich selber bearbeiten kann, statt mit Metall, bei dem ich immer Erwachsene um die Durchführung der gefährlichen Kantarbeit bitten musste.

Deshalb habe ich mir vorgenommen, nach einem von mir bearbeitbaren Ersatzmaterial für das Lego-Technik zu schauen und die Konstruktion umzubauen.

Außer der Verbesserung der Stabilität und damit der Genauigkeit will ich auf Dauer auch noch mehrere Stationen an das Gerät anbauen: a) backen & wenden, b) Füllung aufspeisen und c) zusammenklappen. Für dieses Jahr habe ich mich aus Zeitgründen für die ersten beiden entschieden. Dabei habe ich nach dem Umbau mit „Füllung aufspeisen“ angefangen, weil ich die Idee hatte, den zweiten Speiser für die Füllung an das schon fertige Gestell des Teigspeisers anzubauen. Dann habe ich mich noch mit ersten Versuchen zu der Backstation beschäftigt, die ich später anbauen will.

Recherche-Ergebnisse

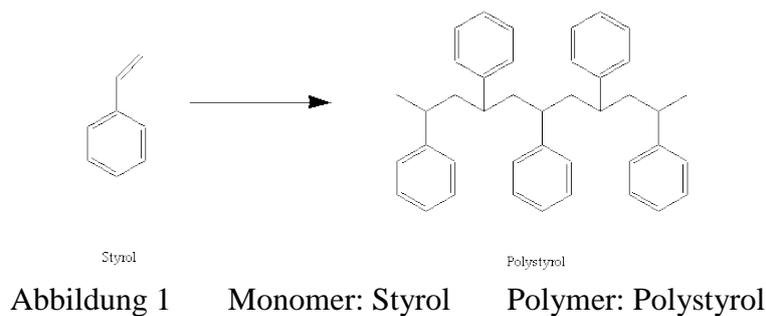
Konstruktionsmaterial

Da ich das Material, mit dem ich die Lego-Technik-Teile ersetzen will, selber bearbeiten will, habe ich an Hobby- und Modellbaumaterial gedacht. Diese haben den Vorteil, dass sie speziell dafür gemacht sind, mit in üblichen Heimwerkstätten vorhandenem Werkzeug bearbeitet zu werden. Die Standardmaterialien [2] sind Holz (MDF [3], Balsaholz [4]), Karton [5] und verschiedene Kunststoffe. Ich habe mich schnell für Kunststoff entschieden, weil die anderen Stoffe große Nachteile für mein Projekt haben:

Holz ist ein toller Werkstoff, aber ein Naturstoff. Es ist faserig, was bedeutet, dass es entlang der Faser unter kleinster Krafteinwirkung brechen kann. Deshalb ist es nicht in alle Richtungen stabil genug. Außerdem verzieht es sich bei Feuchtigkeit entlang der Fasern. Die Probleme mit dem Brechen und Verziehen haben MDF-Platten nicht („Mitteldichte Holzfaser“), dafür quellen sie auf und sind deshalb auch nicht geeignet, da ich mit wasserhaltigen Substanzen arbeiten will.

Das gleiche Problem hat Karton. Auch wenn es inzwischen viele stabile Kartonsorten gibt, sind sie alle nicht haltbar und formstabil bei Feuchtigkeit.

Die Kunststoffe sind vollständig wasserfest. Es gibt verschiedene: Polyacetal für den Spritzguss und für Fertigformteile aus Spritzgussverfahren [6], Platten aus Polymethylmethacrylat (PMMA, „Polyacryl“, „Plexiglas“) [7,8], Polystyrol (PS, „Polystyrene“) in kompakter („Guttagliss“, Hobbyglas/OBI) [9,10] oder geschäumter Form („Styropor“) [11] und noch viele andere. Styropor fällt weg wegen fehlender Stabilität. Polyacetal ist gut bearbeitbar, aber undurchsichtig (weiß, grau, schwarz, u.a.) und ich wollte das Gerät so durchsichtig wie möglich bauen, damit man alles gut erkennen kann. Damit bleiben nur PMMA und PS in Kompaktform übrig. Die Unterschiede sind gering, aber für mich doch eindeutig: PMMA ist spröder, das heißt, die Gefahr, dass etwas bricht ist größer. Außerdem ist es viel teurer als PS-Platten. PMMA hat allerdings einen Vorteil: es vergilbt nicht, wie es PS mit der Zeit unter UV-Licht (Sonne) tut, was allerdings für mich nicht wichtig ist [12,13]. Damit war für mich die Entscheidung klar: Polystyrol [Abb.1] in Form der Guttagliss-Platten von OBI (4mm) [14,15]. Es gibt PMMA und PS auch in klar-farbig und das hätte toll ausgesehen, aber man hätte nicht mehr so viel erkennen können. Außerdem sind die bunten Platten viel teurer, als die ungefärbten.



Fügetechniken Polystyrol

Es gibt zwei Fügetechniken für Polystyrol, das Verkleben und das Verschrauben.

Verschrauben [16]: PS ist ein spröder Werkstoff, den man nicht einfach so, wie Holz, schrauben kann. Man muss ihn klein vorbohren, dann ein passendes Gewinde in die Bohrung schneiden und mit einem größeren Bohrer die Versenkung für den Schraubenkopf ausarbeiten. Erst dann kann man es verschrauben. Das ist viel Aufwand. Und wenn man noch ausprobiert, wie Teile am Ende aussehen sollen, kann es häufiger vorkommen, dass man alles neu arbeiten muss oder die Teile Löcher haben, wo keine sein sollten.

Verkleben: PS kann man nach Auskunft in den Hobbyportalen nicht so toll verkleben. Außerdem ist die Fügestelle nicht sofort, wie beim Verschrauben, fest. Das heißt, man muss die Fügestelle klemmen oder anders halten, bis der Kleber fest ist. Es gibt aber viele verschiedene Kleber und man kann sicher einen schnellhärtenden Stoff auswählen. Außerdem bleiben, wenn man einmal etwas ändern muss, keine überflüssigen, falschen Löcher im Material, wie beim Verschrauben.

Ich habe mich für das Verkleben entschieden.

Druck- oder Quetschspeiser

Nach meinen Überlegungen vom letzten Jahr [1], wollte ich eigentlich keinen Druckspeiser benutzen: [...] *Druckspeiser funktionieren wie Plastikketchup- [17] oder Flüssighonigflaschen [18], 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 einem Besuch in dem Café „Waffel Royal“ in Wiehl [19], bei dem man beim Füllen und Dekorieren der Waffeln zusehen konnte, habe ich aber Quetschflaschen, sogenannte „Squeeze-Flaschen“ kennengelernt, die dieses „Plötzliche“ nicht haben. Nach einem Gespräch mit dem Inhaber, bei dem ich die Flaschen kurz ausprobieren durfte, habe ich mich doch für einen Druckspeiser mit genau solchen Flaschen [20] entschieden.



Abbildung 2 Wilton Mini-Spritzflaschen für Geschmolzenes, 180ml

Projektplanung

Mit meinem Projekt wollte ich die Konstruktion des bestehenden Teigspeisers stabilisieren, einen zweiten Crème- oder Flüssigspeiser anbauen und eine Backstation entwerfen. Das ist auch die Reihenfolge, in der ich arbeiten will.

Maschinenbau:

- XY-Tisch: Ersatz der beiden oberen, passiven Lego-Technik-Rahmen durch Polystyrol-Plattenrahmen, inkl. Motorhalterung für den bleibenden MindStorms-Antrieb.
- XY-Tisch: Ersatz der Zahnelemente auf den beiden unteren Bauteilen durch Polyacetal-Zahnstangen.
- Konstruktion des zweiten Speisers so, dass er an den Teigspeiser mit angebaut werden kann.
- XY-Tisch: neue Metallunterschale wg. Anpassungen an die neuen Zahnstangen und den längeren Laufweg für den zweiten Speiser.
- Beide veränderten Teile (Speiser & XY-Tisch) zusammenbringen und so justieren (räumlich abstimmen), dass sie miteinander laufen können.
- Vorversuche zur Backstation: eindimensionales Backen möglich?

Steuerungstechnik:

- Steuerung aus Lego-EV3 erweitern auf den zweiten Speiser und so programmieren, dass sie alle drei Bauteile (XY-Tisch & 2 Speiser) genau steuert und miteinander synchronisiert (zeitlich abstimmt).

Qualitätsuntersuchung der Maschine:

- mit dem Probierteig von letztem Jahr die Teigspeiserversuche wiederholen und mit denen vom letzten Jahr vergleichen

- ggf. eine zweite Probierteigkonsistenz entwickeln, die der Zähigkeit einer Füllung sehr nahe kommt
- die Maschinenparameter des zweiten Speisers mit dem Probierteig erarbeiten
- die Versuchsreihe für den zweiten Speiser durchführen
- Beobachtung der Stabilität der Konstruktion bzgl. der Probleme vom letzten Jahr (Versatz der Zahnräder, Ausfall der Speisernadel, etc.)
- visuelle und statistische Auswertung der Ergebnisse

Mögliche Fehlerquellen und ihre Bedeutung

Aus den Versuchen vom letzten Jahr war schon klar, dass mehrmals aufzuspeisen immer eine Mengendifferenz hat. Also musste ich, um zuverlässige Ergebnisse zu bekommen, immer mehrere Speiseversuche machen, damit ich sie statistisch auswerten kann. Daher speiste ich bei jedem Versuch 18 Halbschalen, bzw. 18 Füllungsportionen in drei Sechserreihen.

Wie im letzten Jahr nehme ich für die Mengemessung eine Feinwaage ($\pm 0,05\text{g}$), damit ich auch die kleinen Unterschiede zwischen den einzelnen Portionen und zwischen den Versuchen von diesem und letzten Jahr messen kann. Letztes Jahr waren die Abweichungen innerhalb der Messreihen deutlich größer als der reine Bestimmungsfehler der Waage. Ob das auch dies Jahr noch so wäre, wenn die Genauigkeit der Speiser höher würde, musste ich abwarten. Um aus diesen Messungen mit ihren kleinen Unterschieden und Fehlern etwas sicher erkennen zu können, das man auch noch vergleichen kann, verwende ich wieder die statistischen Methoden „Quartilauswertung“, „Mittelwert“ und „Boxplot“.

Auch mit festen Rezepten kann es durch Einwiegefehler, längere Standzeiten und nicht gleichmäßiges Verrühren passieren, dass die Probierteige nicht immer genau die gleiche Konsistenz haben und sich deshalb verschieden verhalten. 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.

Maschinenbau & Justage

Fügeversuche Polystyrol

Da in den Modellbauforen immer davon gesprochen wird, dass PS schwer zu verkleben ist, habe ich mir mehrere Klebstoffe besorgt, um sie vor dem Umbau zu testen. Dabei habe ich darauf geachtet, dass auf den Etiketten immer PS als ffügbar stand. Allerdings habe ich nicht den in den Foren [\[21,22\]](#) als besten genannten Klebstoff genommen, weil das ein reines und gefährliches Lösungsmittel ist: Dichlormethan (GESTIS-Stoffdatenbank [\[23\]](#): CAS 75-09-2; GHS H315, 319, 335, 336, 351, 373). Dies soll besonders gut fügen, weil es beide Seiten des PS an der Fügestelle anlöst und sie bei seinem Verdunsten miteinander verschmelzen lässt. Aber wegen seiner Gefährlichkeit ist das für mich keine Option.

Ich habe erst einmal folgende Klebstoffe getestet:

- (1) Empfehlung von OBI: „Fix-All“, silikonartige Klebekartusche, 24h Trocknung, 48h bis durchgehärtet, kristallklar härtend
- (2) Vorrat zu Hause: „UHU-Sekundenkleber 3x1g Minis“, Cyanacrylat, <1min Trocknung, 12h bis durchgehärtet, klar härtend

Ich habe mir viele PS-Plättchen (15x50x4mm) gesägt und mit jedem der beiden Kleber einmal zwei Platten flach aufeinander geklebt und einmal eine Platte mit der Kante auf die Fläche der anderen. Die Klebungen mit dem Silikon waren beide nach 15h noch leicht verschiebbar und gut trennbar. Auch nach 18h war keine Verbesserung zu sehen. Dieser Kleber hält eben nur physikalisch die beiden Platten fest und hält erst dann, wenn er nach 24h komplett ausgehärtet ist. Geht also vielleicht für PS, aber nicht für mein Projekt.

Der UHU-Sekundenkleber hat bei beiden Proben fast sofort gehaftet, war aber nach 4h und nach 12h auch noch mit etwas Kraft mit der Hand zu lösen. Dabei hielt die Fläche-Fläche-Klebestelle etwas besser, aber nicht gut genug.

Da ich mit diesen Klebern nicht zufrieden war, habe ich noch mit 3 anderen Klebern die gleichen Versuche gemacht (2a, 3, 4).

- (2a) Empfehlung von Henkel: „Pattex-Sekundenkleber Minitrio“, Ethyl-2-Cyanacrylat, <1min Trocknung, 12h Aushärtezeit
- (3) Vorrat zu Hause: „Ponal Konstruktion PUR“, 1K-Polyurethan, (Alleskleber der Baubranche), Trocknung nach 1h, 12h Aushärtezeit
- (4) Vorrat zu Hause: Faller Super Expert; lösemittelhaltiger Klebstoff auf N-Butylacetat-Basis, keine Zeiten angegeben

Bei dieser Serie habe ich die meiste Hoffnung auf den Modellbaukleber von Faller gesetzt, weil der zum einen im Eisenbahnmodellbau fast alles klebt und zum anderen, weil er lösemittelhaltig ist. Das wäre am ehesten ein Kleber, wie er in den Foren vorgeschlagen wurde.

Gesamtergebnis der Klebeversuche:

Leider war der schwächste Kleber dann doch die Nr. 4 (Modellbaukleber mit Lösemittel). Der spezielle silikonartige Kleber aus dem Baumarkt ist nach 15h noch nicht ausgehärtet und löst sich komplett vom Material ab. Bei Nr. 3 hängt die Haftung von der Schichtdicke ab. Bei zu dicker Kleberschicht trennt sich der Kleber innerhalb der Schicht. Da diese offenbar genauer und dünner aufgetragen werden muss, was mir als Anfänger schwer fällt, kann ich diesen Kleber nicht verwenden.

Die Sekundenkleber Nr. 2 und Nr. 2a unterscheiden sich nur leicht voneinander. Nr. 2 lässt sich leichter trennen als Nr. 2a, aber insgesamt reagieren sie zu einer höheren Festigkeit als alle anderen. Jedoch kann man sie auch noch alle mit der Hand wieder lösen.

Da kein Kleber dauerhaft und fest genug hält, habe ich für den besseren Halt dann doch die aufwändigere Methode „Verschrauben“ gewählt.

Umbau des XY-Tisches

Der Tisch besteht aus drei Ebenen:

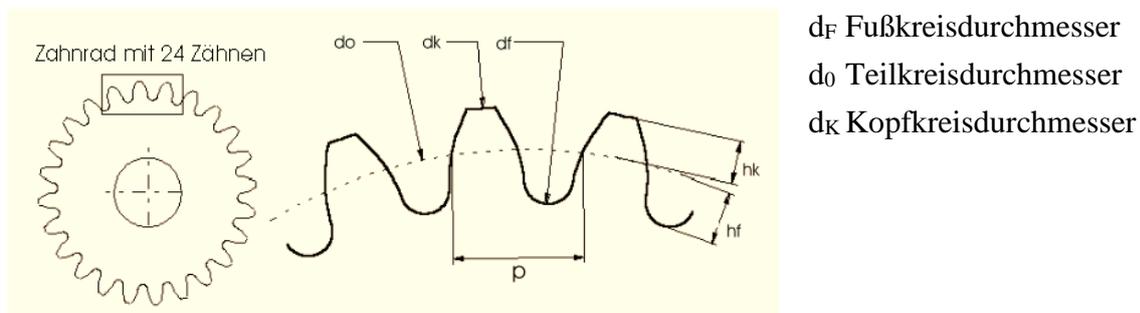
- (1) dem unteren Fahrweg in einer Metallschale,
- (2) dem mittleren Rahmen, der auf dem unteren Fahrweg in Y-Richtung fährt und den Fahrweg für die obere Ebene trägt
- (3) dem oberen Rahmen, der auf dem mittleren Fahrweg in X-Richtung fährt und die Speiserplatte trägt

Der Umbau von (1) war einfach: der Lego-Innenrahmen (245mm x 415mm) in der Metallschale musste nur abgeschraubt und herausgenommen werden und die Zahnstangenbauteile durch Spritzguss-Zahnstangen ersetzt werden.

Bei der Auswahl der richtigen Zahnstangen habe ich gelernt, wie man erkennt, welche Zahnstange zu welchem Zahnrad passt. Ich wollte ja meine aktiven Lego-Teile für die Kopplung an die MindStorms-Steuerung behalten und brauchte Zahnstangen, die zu den Lego-Zahnradern passen.

Da es viele verschiedene Durchmesser und Zahnungen gibt, habe ich mich nach einer Größe umgeschaut, mit der ich die richtigen Zahnstangen finden kann: Der Modul m [24].

M beschreibt einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Zähne und dem Durchmesser des Zahnrades. Da es mehrere Durchmesser an einem Zahnrad gibt, muss man aufpassen, welchen man nimmt. Es gibt drei Durchmesser:



Für die Berechnung des Moduls teilt man den Teilkreisdurchmesser in [mm] durch die Zahl der Zähne am ganzen Rad:

$$m = \frac{\text{Teilkreisdurchmesser [mm]}}{\text{Zahnzahl}}$$

Der Modul der Lego-Räder ist also: $m = \frac{23,5\text{mm}}{24} \sim 1$

Ich habe daher Polyacetal-Spritzguss-Zahnstangen (9x9x250mm; $m=1$; Maedler [6]) gewählt. Dabei musste erst ein Distanzklotz auf beiden Seiten untergelegt werden, weil ich die Metallschale ja nicht alleine bearbeiten durfte und die Kürzung der Oberkante ([1] äußerer Rahmen

des Fahrwerks) erst im Februar durchgeführt werden kann [Abb.3]. Dann wird auch gleich der Fahrweg, der jetzt nur durch die Klötze gestützt wurde verlängert, so dass er auch ohne Stütze bis unter den zweiten Speiser geht. Außerdem werde ich in den unteren, hochstehenden Seitenteilen auf beiden Seiten jeweils ein 18mm Loch bohren und versäubern. Diese dienen als Kabeldurchführung, damit die beiden Speiserkabel nicht den Fahrweg der Backplatte stören. Man erkennt deutlich, wieviel einfacher die Konstruktion ohne die stabilisierenden Streben geworden ist, vor allem für die Kabeldurchführungen. Die 20mm fehlende Aufbauhöhe werden über Schraubfüße der Speiserhalterung ausgeglichen.



Modell 1.0

Modell 2.0 .

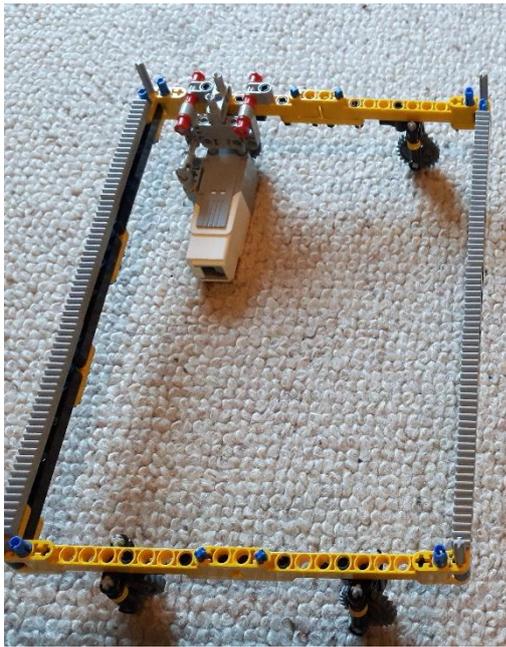
Abbildung 3: unterer Fahrweg; vorher/nachher

Der Umbau des mittleren Rahmens (2) war etwas komplizierter.

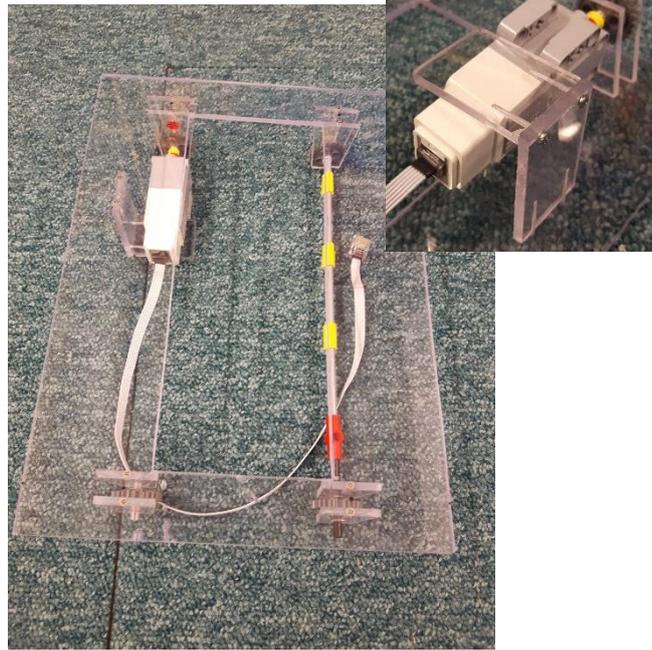
Rahmen: 200mm x 250mm; Radstände: zw. Achsen 105mm, Rädermitten: 240mm

Das Außenmaß musste stimmen, weil sonst der Speiserweg nicht eingehalten werden kann. Die Höhe der Radhalterungen musste genau stimmen, weil sich der ganze Tisch sonst in der Höhe verschiebt und das Mittelloch musste genau da liegen, wo der Motor des oberen Rahmens (3) später seinen Fahrweg hat, weil er unter dem oberen Rahmen angebracht ist. Außerdem durfte es nicht zu groß sein, damit nicht zu viel Material fehlt, das eigentlich für die Stabilität des Rahmens da ist [Abb.4; Zahnstangen fehlen noch, werden von unten verschraubt]. Ein großer Vorteil ist, dass ich mit dem Polystyrol als Material nicht mehr auf die vorgegebenen Maße der Legobauteile angewiesen bin und passgenau bauen und konstruieren kann.

Zusätzlich wurde eine feste Motorhalterung angebaut, auf der der Motor fest aufliegt und noch gespannt werden kann. Das war eine Schwachstelle im alten Aufbau, da die Maße der Legosteine keine so genaue Positionierung mitgemacht haben. Dadurch, dass im untersten Fahrweg (1) keine Querstreben mehr gebraucht werden, hatte im mittleren Rahmen sogar noch eine Querachse Platz, die den Fahrweg stabilisiert.



Modell 1.0

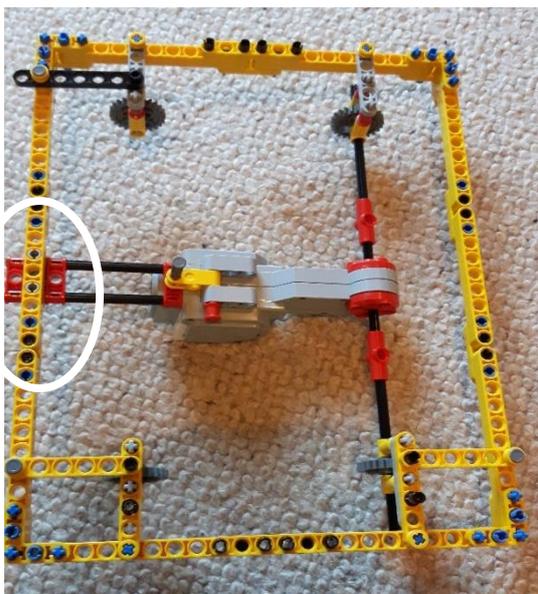


Modell 2.0

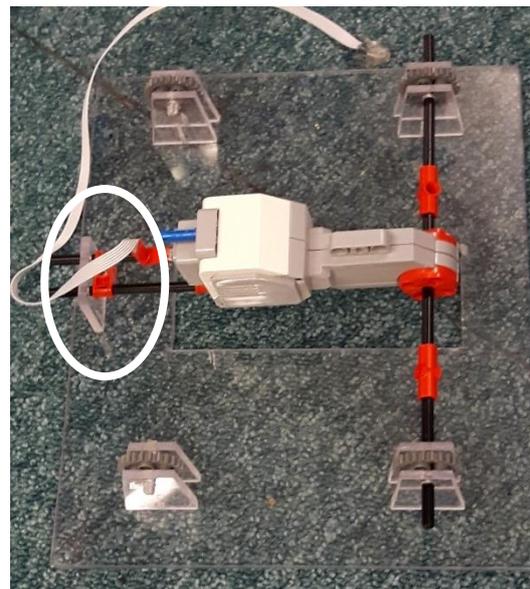
Motorhalterung.

Abbildung 4: mittlerer Rahmen/Fahrweg; vorher/nachher

Der Umbau des obersten Rahmens (3) wurde genauso durchgeführt, wie der des mittleren (2) [Abb.5]. Rahmen: 90mm x 250mm, Radstände: zw. Achsen 105mm, Rädermitten 185mm. Da ich nicht mehr auf das Legomaß achten musste und durch das Loch im mittleren Rahmen mehr Platz hatte, konnte ich die vorher immer schräg und unter Spannung stehende hintere Motorhalterung des obersten Rahmens begradigen. Auch dieser Rahmen hat ein Loch bekommen, um darin vielleicht später einmal Ansatznoppen vom Backblech einzurasten, damit man es immer gleich auflegt und sich nichts verschiebt.

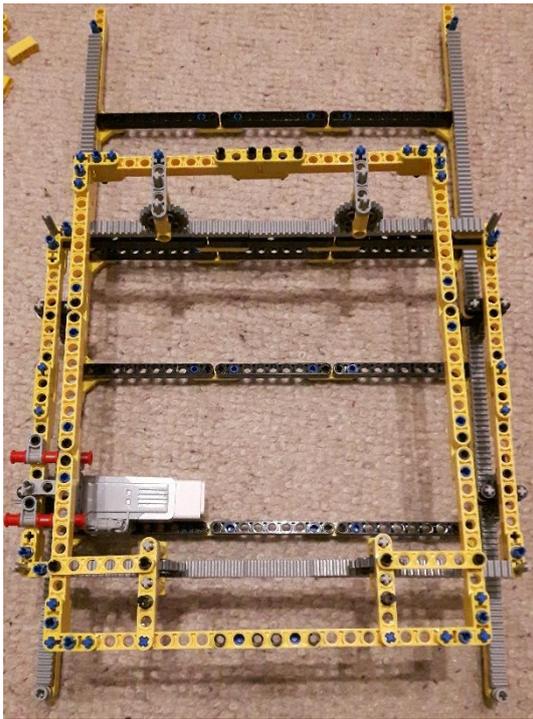


Modell 1.0

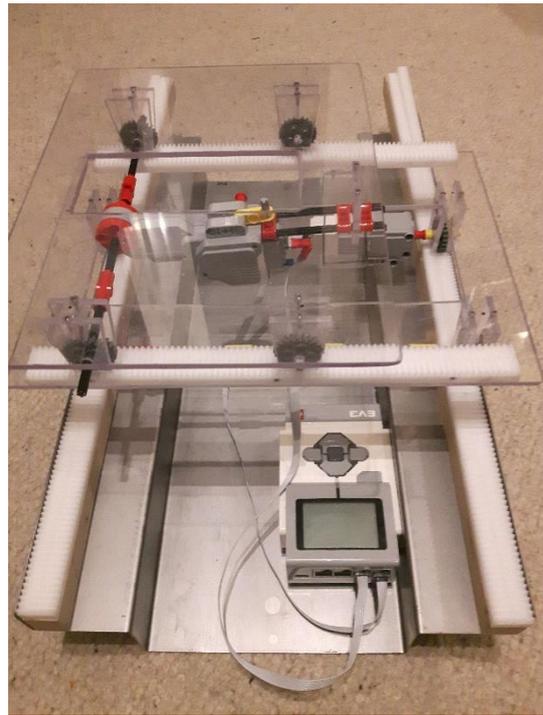


Modell 2.0

Abbildung 5: oberer Rahmen/Fahrweg; vorher/nachher



Modell 1.0



Modell 2.0

Abbildung 6: XY-Tisch komplett; vorher/nachher

Umbau des Teigspeisers

Der Umbau des Teigspeisers war der komplizierteste Teil, weil das Legoteil wegen seiner festen Maße so kompliziert konstruiert war. Es war nach der langen Zeit erst sehr schwer, sich vorzustellen, was man davon wirklich brauchte und was nur da war, damit das Ganze mit Lego funktionierte. Danach war der Rest wieder einfach: es braucht nur den Motor auf der richtigen Höhe und eine Speisernadel an einer Zahnstange, die nahe am Zahnrad des Motors ganz grade von unten nach oben festgehalten wird. Und das genau über dem Speiserloch. Dazu habe ich mir eine 1:1-Konstruktionszeichnung der beiden Halterplatten gemacht, mit der ich alle Bohrungen genau auf den Punkt bringen konnte.

Den Abstand zwischen den Platten habe ich durch vorgefertigte Abstandsbolzen festgelegt und die Motorhalterung sind nur stramme Durchsteckbolzen, damit man den Motor leicht herausnehmen kann. Die Speisernadel habe ich einfach in den Rücken der Zahnstange geklebt. Die Nut dafür habe ich ausgefräst. Diese Klebung hat überraschenderweise mit dem Faller Modellbaukleber prima gehalten. Damit die Zahnstange auch am Zahnrad gehalten wird, habe ich noch zwei Halterungen rund um die Zahnstange herum angebracht. Abbildung 7 zeigt den alten und den neuen Halter der Speisernadel.



Modell 1.0



Modell 2.0

Abbildung 7: Speisernadelhalter; vorher/nachher

Konstruktion des Füllungsspeiser

Bei der Konstruktion des Füllungsspeisers gab es ein neues Thema, auf das ich achten musste. Um die Füllung aus der Druckflasche zu pressen, musste eine viel stärkere Kraft von dem Motor aufgebracht werden, als bei den anderen Bauteilen. Dabei durfte ich den Motor nicht überlasten und musste vor allem darauf achten, dass die Kraft immer ganz grade auf der Achse blieb, damit keine Schäden am Motor entstanden. Ein Linearantrieb mit Zahnstangen, wie bei den anderen Bauteilen reicht nicht aus, um die Kraft grade zu übertragen, die Zahnräder springen aus der Führung. Deshalb habe ich auch teilweise dickeres Konstruktionsmaterial (8mm) benutzt. Die Idee ist ein „falscher Schraubenantrieb“, der so festgehalten wird, dass die an der Motorachse befestigte Gewindestange (OBI, M4), etwas vorwärtsschiebt, statt es zu drehen. Das „Festhalten“ habe ich mit einem Teil aus meiner Kramkiste (Nullleiterschiene) gebaut, ein langes, aber rechteckiges Stück Metall, das ich für die Achse mit einem Gewinde durchgebohrt habe. Das steckt dann in einem genau passenden quadratischen Loch in einer Polystyrol-Platte. Da es sich so nicht mit der drehenden Achse mitdrehen kann, „fährt“ es auf der Achse vor und zurück, je nach Drehrichtung. Dabei schiebt es einen vorne befestigten Schraubenkopf gegen die Quetschflasche und drückt die Füllung heraus. Durch den Vorschub und die Haltezeit, bevor es zurückfährt, steuert man die Menge der Füllung, die herauskommt. Am anderen Ende, also hinter dem Motor habe ich noch eine Anschlagplatte befestigt, damit mir die Gewindestange nicht beim Rücklauf aus Versehen aus dem Block rutscht. Abbildung 8 zeigt den kompletten Füllungsspeiser. Er ist so an der alten Speiserhalterung festgemacht, dass der neue Speiser genau in einer Linie in Y-Richtung hinter dem Teigspeiser steht und deshalb mit dem verlängerten XY-Tisch gut erreicht werden kann.

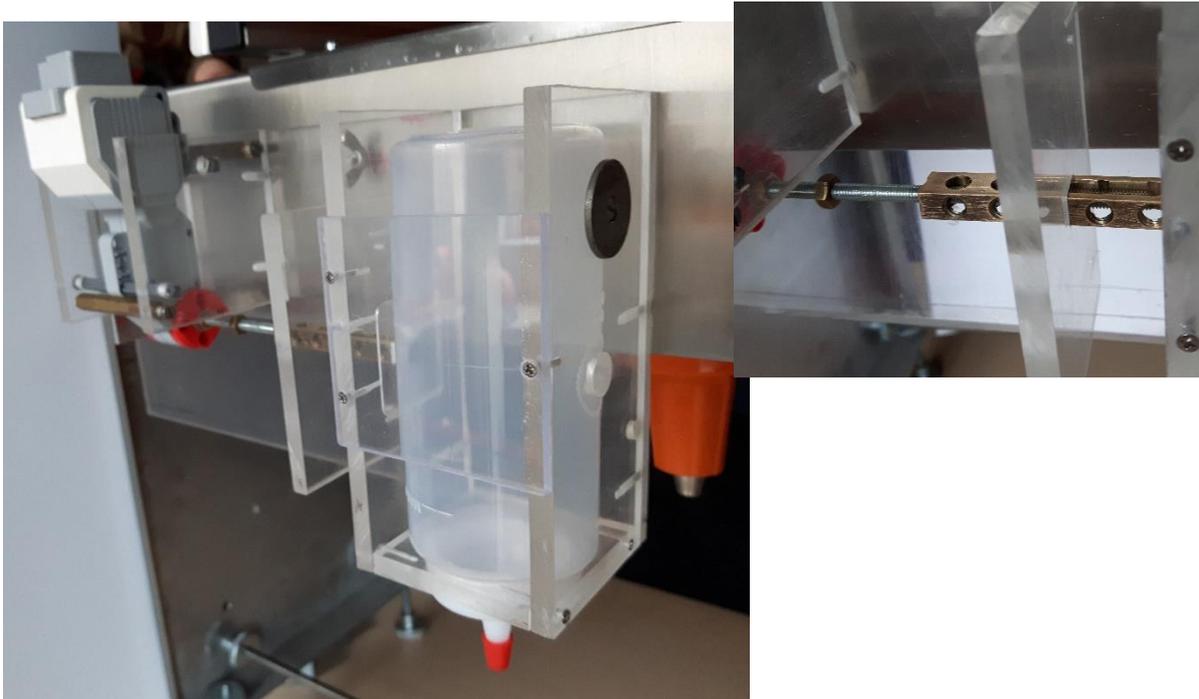


Abbildung 8: Füllungsspeiser

Erste Versuche zu einer Backstation

Übliche Haushalts- aber auch Industriebacköfen kann man als heiße, geschlossene Räume sehen. Die Backtemperatur für Macarons ist 160°C Umluft, die Zeit beträgt 12-15 Minuten, je nach Größe und Ofen. Ich denke, Umluft kann ich sicher nur schwer erzeugen, vor allem in der Nähe von so viel Kunststoff. Und auch ein geschlossener Backraum ist sicher aufwändig. Wärme steigt nach oben und deshalb wären der heißesten Punkte im Ofen der, an dem die Hitze erzeugt wird und der obere Teil der Ofenabdeckung, die man auch Gewölbe nennt.

Ich hatte die Idee für etwas einfacheres, das für mich auch verfügbar war: eindimensionales Backen auf dem heißen Stein. Denn ein Pizzaofen ist ja auch nur ein heißer Ofenstein mit einem Gewölbe darüber. Dafür habe ich den echten Macaronteig vom Vorjahr genommen [25] und ihn erst einmal mit der Hand auf ein Backpapier portioniert, nach Rezept und Erfahrung trocknen lassen und dann auf dem vorher erhitzten heißen Stein gebacken. Das sah gut aus, von außen sahen die Macarons genauso aus, wie sie sollten, sogar die typische Macaronkante war erkennbar. Leider konnte ich aber auch nach mehreren Versuchen keine Einstellung finden, bei der sie auch innen durchgebacken waren, ohne unten zu verbrennen [Abb.9].



Abbildung 9: eindimensionales Backen auf dem heißen Stein

Programmentwicklung & Synchronisation

Das Titelbild der Arbeit zeigt das alte und das neue Gerät im aktuellen Komplettaufbau.

Die Steuerung des XY-Tisches und des Teigspeisers über die EV3-Software wurde 1:1 aus dem Vorjahr übernommen, lediglich der Parameter der Speiserverschlusszeit wurde neu angepasst, da der Probierteig, wahrscheinlich durch eine andere Mehlsorte, eine etwas andere Zähigkeit hatte. Ich habe versucht, das durch mehr Wasser auszugleichen, musste aber trotzdem noch nachsteuern.

Das gleiche Programm habe ich genommen, um den Füllungsspeiser zu betreiben und habe nur die Motorsteuerung der beiden Speiser ausgetauscht. Neu entwickelt habe ich dies Jahr also nur die Steuerung für den Füllungsspeiser [Abb.10]. Diese Abbildung zeigt ein Bild des Programms stark verkleinert, nur um den Aufbau als Schema darzustellen.

Durch die mechanischen Anschläge der Tischebenen, braucht für den Tisch am Anfang lediglich die Startposition der unteren Ebene unter dem neuen Speiser angefahren zu werden. Deren Rücksetzung ist am Ende auch der letzte Programmschritt, damit die beiden Speiser vollautomatisch abwechselnd oder auf Auswahl laufen könnten.

Durch die serielle Verarbeitung der Steuerungsbefehle in der EV3-Software von MindStorms ist die Synchronisation der Bauteile fast schon alleine sichergestellt. Lediglich die rein physikalische Abtropfdauer des Teigspeisers muss beobachtet und in den Fahrablauf des XY-Tisches eingebaut werden.

In Wirklichkeit läge aber der Backvorgang mit der Drehung der zu füllenden Hälften ja zeitlich noch zwischen dem Teigspeisen und dem Füllungsspeisen.

Nach Erreichen der Startposition fährt auch der Drücker einmalig in eine vorgerückte Startposition und dann startet das Programm mit der ersten Schleife, in der immer zuerst einmal Füllung aufgespeist 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 Einfahren, ein Halten und ein Herausfahren des Drückers. Da beim Herausfahren ein leichter Unterdruck auf der Flasche ist, braucht keine Abtropfzeit eingehalten zu werden, der Resttropfen wird heraufgezogen.

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 jedes Mal 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 erst der Drücker in seine Startposition und dann der Tisch.



Abbildung 10 Schema d. Steuerung d. Füllungsspeisers

Durchführung Geräteprüfung

Für die Durchführung der Speiseversuche habe ich das leicht angepasste Probierteigrezept vom Vorjahr genommen (300g Mehl 550er, 450ml Wasser, 20min ausquellen). Da dieser auch eine mögliche Zähigkeit einer weichen Füllung hat, habe ich für beide Speiser den gleichen Teig verwendet, der auch nach längerer Zeit, über den ganzen Tag hinweg, noch gut und mit gleichen Eigenschaften zu benutzen war.

Nun habe ich den ersten Praxistest gemacht und sofort gemerkt, dass das ganze Gerät viel gleichmäßiger, ruckelfreier arbeitet und keine Störungen mehr auftreten, wie Wackeln, Abrutschen der Speisernadel oder Verspringen von Zahnräder. Auch die Kabelführung ist viel einfacher geworden und ich brauche nicht mehr ständig mit der Hand Kabel festzuhalten, damit sie dem fahrenden Tisch nicht in den Weg geraten.

Dann habe ich, um die Qualität mit der vom alten Aufbau zu vergleichen, genau die gleiche Testserie durchgeführt, wie für die Vergleiche der Speisernadelköpfe im Vorjahr: 18 Speisungen in 3 Reihen zu je 6 Portionen, mit dem besten Speisernadelkopf und dem genauesten Trichterauslauf („Kegel mit fester Tülle“).

Danach habe ich die Qualität der Füllungsspeisung genauso getestet. Die Frage war, ob der Druckspeiser die Füllung genauso exakt dosieren kann, wie der Nadelspeiser den Teig.

Ergebnisse & Diskussion

Die beiden Messreihen habe ich mit der gleichen statistischen Software [26] aufbereitet, wie im Vorjahr und den besten Ergebnissen des „alten“ Geräts gegenüber gestellt [Tab.1].

Schon an den rohen Messdaten kann man sehen, dass beide Speiser jetzt sehr genau arbeiten. Eine Verbesserung war auch meine Erwartung, nachdem ich im ersten Praxistest des neuen Geräts gesehen habe, wieviel stabiler die Konstruktion und damit der ganze Ablauf durch den Umbau geworden sind. Nur für den Füllungsspeiser war ich wegen des anderen Mechanismus mit dem Kraftaufwand nicht sicher.

Die statistische Auswertung verstärkt das Ergebnis [Abb.11].

Die Verringerung der Spannweite von 28% auf 13%, von altem zu optimiertem Teigspeiser bei gut erreichtem, vergleichbaren Mittelwert, ist ein viel besseres Ergebnis, als ich erwartet hatte. Auch der Füllungsspeiser, der trotz des belasteten Mechanismus lediglich 20% Spannweite zeigt, arbeitet viel genauer, als erwartet. Beide Messreihen des neuen Geräts zeigen auch viel engere Verteilungen zum Mittelwert hin, nicht nur enger liegende Extremwerte. Das erkennt man besonders gut an den Box Plots, wo ich sogar die Achse spreizen musste, damit für den direkten Vergleich der beiden Teigspeiser die Verteilungen überhaupt gut angezeigt werden.

Die rohen Messdaten der Speiservergleichsmessung zeigen allerdings langsam sinkende Werte. Das nennt man einen Trend und er ist meistens auf eine Änderung der Umgebung zurückzuführen. Ich denke, dass er bei mir daher kommt, dass nach und nach immer weniger Teig im Trichter ist und deshalb der Schweredruck auf den auslaufenden Teig immer kleiner wird. Deshalb fließt in der gleichen Zeit immer weniger Teig heraus. Um auch das noch auszugleichen, könnte man den Trend in noch mehr Messreihen genauer ausmessen und dann versuchen, ihn durch langsames Hochfahren der Speiserschleifenzeiten im Programm auszugleichen.

Seltsam ist, dass das bei dem geschlossenen, kleineren Füllungsspeiser/-behälter nicht passiert. Eigentlich müsste ja beim Speisen langsam ein wachsender Unterdruck im geschlossenen Speiser entstehen, der den auslaufenden Teig „zurückhält“. Ich hatte eigentlich fest damit gerechnet, oben in die Flasche ein Belüftungsloch machen zu müssen und hatte Angst, dass dann der Motordruck nicht mehr ausreicht, um überhaupt Teig aus der Flasche zu bekommen. Aber aus den Daten ist das nicht erkennbar. Der Füllungsspeiser arbeitet ohne Trend.

Mit diesen Ergebnissen kann ich mit meinem Umbau und der Erweiterung, also dem Gerät für „Perfekte Macarons 2.0“, wirklich sehr zufrieden sein.

Nur die Versuche, auf unkompliziertem Weg zu einer Backstation zu kommen, waren nicht erfolgreich, da bei dem eindimensionalen Backen keine Einstellung gefunden wurde, bei der

akzeptable Backergebnisse erreicht werden konnten. Damit muss ich mich wohl noch etwas beschäftigen. Wahrscheinlich sollte ich doch ein Gewölbe bauen, damit die Hitze oben und unten gleichmäßiger ist. Das und die beiden Mechanismen, um die Schalen nach dem Backen zu wenden und nach dem Füllen zusammenzuklappen, kann ich mir gut als Arbeit für das kommende JuFo-Jahr vorstellen.

Rohdaten	Altdaten Teigsp.	Neudaten Teigsp.	Füllungs-sp.	statistische Daten	Altdaten Teigsp.	Neudaten Teigsp.	Füllungs-sp.
1	6	6,0	2,1	%ale Spannweite	28	13	20
2	6,2	6,0	2,0	Spannweite abs	1,7	0,7	0,4
3	6,9	6,1	2,2	größter abs	6,9	6,2	2,4
4	7,5/6,5*	6,1	2,2	kleinster abs	5,2	5,5	2,0
5	5,9	6,2	2,1	Mittelwert	6,2	5,9	2,2
6	5,2	5,9	2,2	Q1	5,9	5,7	2,1
7	6,2	6,0	2,1	Median	6,2	6,0	2,2
8	5,7	6,0	2,2	Q3	6,6	6,0	2,2
9	5,8	6,1	2,1	Q1-Minimum	0,7	0,2	0,1
10	5,5	6,0	2,2	Q1	5,9	5,7	2,1
11	6,8	5,8	2,0	Median-Q1	0,3	0,2	0,1
12	6,3	5,8	2,3	Q3-Median	0,4	0,0	0,0
13	6,8	5,7	2,2	Maximum-Q3	0,3	0,2	0,2
14	6,8	5,7	2,2				
15	6,2	5,8	2,3				
16	6,6	5,5	2,4				
17	6,2	5,6	2,2				
18	5,9	5,6	2,3				

Tabelle 1: Messdaten Gewicht [g] Tabelle 2: Statistische Daten

*unsicherer Messwert: 2 Personen haben unterschiedlich abgelesen: ausgelassen

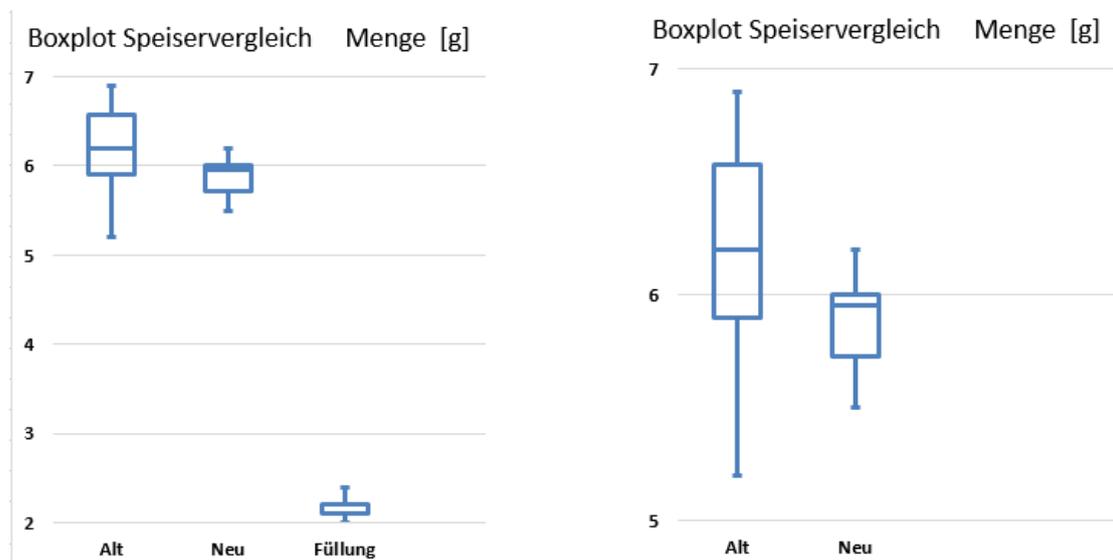


Abbildung 11: Boxplots Speiservergleich

Quellenangaben

Die Internetseiten wurden alle im Januar 2018 noch einmal aufgerufen, um sicher zu sein, dass sie noch aktuell sind.

- [1] „Perfekte Macarons – Handwerk oder Technik?“, Robin Wolff, Regional- und Landeswettbewerb „Schüler experimentieren“ 2017
- [2] <http://www.ebay.de/gds/Materialvielfalt-beim-Modellbau-was-ausser-Holz-Kunststoff-und-Metall-noch-eingesetzt-wird-/10000000177910914/g.html>
- [3] https://de.wikipedia.org/wiki/Mitteldichte_Holzfaserplatte
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Balsabaum#Balsaholz>
- [5] [https://de.wikipedia.org/wiki/Karton_\(Werkstoff\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Karton_(Werkstoff))
- [6] <http://www.maedler.de/product/1643/1618/2130/zahnstangen-kunststoff-polyacetal-gespritzt-modul-05-bis-3>
- [7] <http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/de/Pages/default.aspx>
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Polymethylmethacrylat>
- [9] <https://www.gutta.com/de/produkte/dekorplatten/hobbyplatten-glasklar.html>
- [10] <https://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol>
- [11] <http://www.rygol.de/produktion.html>
- [12] <https://acrylglas-online.com/acryl-polystyrol/>
- [13] <http://www.hausjournal.net/acrylglas-vs-andere-kunststoffe>
- [14] Produktdatenblatt Hobbyglas/Guttagliss <https://www.obi.de/kunststoffbedachung/hobbyglas-0-4-cm-transparent-50-cm-x-25-cm/p/3712056>
- [15] http://www.chemgapedia.de/vsengine/tra/vsc/de/ch/7/tc/trajektorien/kompakt_kurs/mm_chemie.tra/Vlu/vsc/de/ch/10/styrol_polymerisation/polystyrol/polystyrol.vlu.html
- [16] Auskunft und Anleitung zur Bearbeitung von Polystyrol, Dez.17-Jan.18, Hobbymodellbauer (Eisenbahnen) Hubert Wolff
- [17] <http://www.heinzketchup.ch/de-de/products/limitededition/tomato-ketchup>
- [18] <http://www.langnese-honig.de/unsere-produkte/187.html>
- [19] <https://www.facebook.com/Waffel-Royal-163051410943983/>
- [20] Wilton Mini-Spritzflaschen für Geschmolzenes, Kunststoff, Weiß, 4.90 x 4.90 x 15.87 cm, 1 Einheiten (Wilton, 0261294)
- [21] <http://www.schiffsmodell.net/index.php?/forums/topic/3110-polystyrol-welcher-kleber-ist-nun-wirklich-die-erste-wahl/>
- [22] <https://www.rc-modellbau-portal.de/index.php?threads/verarbeitung-von-polystyrol.365/>
- [23] <http://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-stoffdatenbank/index.jsp>
- [24] <https://www.motor-talk.de/bilder/zahnrad-modul-g76880348/modul-zahnradberechnung-i208882199.html>
- [25] José Maréchal, „Macarons“, AT-Verlag Baden & München, ISBN 978-3-03800-593-3, 5. Auflage, 2013
- [26] <http://www.sixsigmablackbelt.de>

Unterstützerleistungen:

- Dr. Silke Wolff: Betreuerin der JuFo-AG am Erzbischöfliche St. Angela-Gymnasium
- Hubert Wolff: Berater und Anleiter bei der Polystyrolverarbeitung