

Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das
Lehramt an Gymnasien im Fach Physik, eingereicht der Hessischen
Lehrkräfteakademie
- Prüfungsstelle Frankfurt -

Entwicklung von physikalischen Experimenten mit Lego

Verfasser: Adrian Lamann

Gutachter: Prof. Dr. Thomas Wilhelm
Institut für Didaktik der Physik
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Abstract

Das Experimentieren stellt eine zentrale Methode im Physikunterricht dar. Es fördert das Verständnis naturwissenschaftlicher Zusammenhänge und wichtige Kompetenzen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung von physikalischen Experimenten mit Lego und inwiefern diese als ernstzunehmendes Unterrichtsmaterial anzusehen sind. Der Vergleich wird zu klassischen Lehrmitteln an Schulen gezogen, insbesondere in Ergebnis und Preis. Nach einer theoretischen Auseinandersetzung mit Experimenten und Spielzeug im Unterricht werden Experimente aus Lego vorgestellt, die, bis auf eine Ausnahme, alle eigenständig entwickelt wurden. Hierzu zählt der zweiseitige Hebel, der Flaschenzug, das Wellrad, das Tellurium, die Kreisbewegung, ein Versuch zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung und mehrere Versuche zur Energieumwandlung. Für jedes Experiment wird eine physikalische Grundlage und eine didaktische Einbettung erarbeitet. Hiernach folgt jeweils die Umsetzung mit Lego und es werden, wie eingangs erwähnt, direkte Vergleiche zu ähnlichen Experimenten gezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass Lego in den meisten Fällen eine kostengünstige und flexible Alternative darstellt, bei der man keine Abstriche in den Ergebnissen machen muss. Die Arbeit gibt zum Abschluss noch einen Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen und den möglichen Einsatz an Schulen und Universitäten.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zielsetzung	7
2.	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Das Experiment	9
2.2	Spielzeug im Physikunterricht: Lego.....	11
3.	Experimente	13
3.1	Experiment zum zweiseitigen Hebel	14
3.1.1	Physikalischer Hintergrund	14
3.1.2	Didaktische Überlegungen.....	15
3.1.3	Integration von Lego.....	16
3.1.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	18
3.1.5	Reflexion und Optimierung	19
3.2	Experiment zum Flaschenzug.....	19
3.2.1	Physikalischer Hintergrund	19
3.2.2	Didaktische Überlegungen.....	21
3.2.3	Integration von Lego.....	22
3.2.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	24
3.2.5	Reflexion und Optimierung	26
3.3	Experiment zum Wellrad	26
3.3.1	Physikalischer Hintergrund	26
3.3.2	Didaktische Überlegungen.....	27
3.3.3	Integration von Lego.....	29
3.3.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	31
3.3.5	Reflexion und Optimierung	32
3.4	Tellurium – Sonne, Erde, Mond	33
3.4.1	Physikalischer Hintergrund	33
3.4.2	Didaktische Überlegungen.....	35
3.4.3	Integration von Lego.....	37
3.4.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	38
3.4.5	Reflexion und Optimierung	39
3.5	Experiment zur Kreisbewegung	40
3.5.1	Physikalischer Hintergrund	40
3.5.2	Didaktische Überlegungen.....	43

3.5.3	Integration von Lego.....	44
3.5.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	47
3.5.5	Reflexion und Optimierung	50
3.6	Experiment zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung.....	51
3.6.1	Theoretischer Hintergrund.....	51
3.6.2	Didaktische Überlegungen.....	52
3.6.3	Integration von Lego.....	54
3.6.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	55
3.6.5	Reflexion und Optimierung	57
3.7	Experimente zu Energieumwandlungsprozessen.....	58
3.7.1	Physikalischer Hintergrund	58
3.7.2	Didaktische Überlegungen.....	60
3.7.3	Integration von Lego.....	62
3.7.3.1	Balliste	63
3.7.3.2	Katapult.....	64
3.7.3.3	Dynamo.....	65
3.7.4	Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten.....	66
3.7.5	Reflexion und Optimierung	67
4.	Fazit und Ausblick	69
5.	Literaturverzeichnis	71
6.	Anhang.....	74
7.	Versicherung	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hebelversuch mit Lego, eigenes Rendering erzeugt mit Studio 2.0	16
Abbildung 2: Hebel Phywe, übernommen aus Hebel, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., https://www.phywe.de/physik/mechanik/stoff-materialeigenschaften/hebel_689_1620/	18
Abbildung 3: Einseitiger Hebel Phywe, übernommen aus Einseitiger Hebel, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/versuche-sets/schuelerversuche/einseitiger-hebel_9695_10626/	18
Abbildung 4: Flaschenzug aus Lego, eigenes Rendering erzeugt mit Studio 2.0	22
Abbildung 5: Flaschenzug mit 4 Rollen, übernommen aus Flaschenzug mit 4 Rollen, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/physik/mechanik/dynamik-bewegung/flaschenzug-mit-4-rollen_449_1380/	24
Abbildung 6: Flaschenzug mit Ständer, übernommen aus Flaschenzug mit 4 Rollen, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/versuche-sets/schuelerversuche/flaschenzug-mit-4-rollen_9692_10623/	24
Abbildung 7: Wellrad, übernommen aus Wellrad, von Wikipedia, o. D., de.wikipedia.org/wiki/Wellrad/	27
Abbildung 8: Wellrad auf Burg Ronneburg übernommen aus Burg Ronneburg, von Wikipedia, o. D., de.wikipedia.org/wiki/Burg_Ronneburg/	27
Abbildung 9: Wellrad aus Lego, eigenes Foto.....	29
Abbildung 10: Wellrad Phywe, übernommen aus Wellrad, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/versuche-sets/versuche-fuer-sekundarstufe-i/wellrad_9412_10343/	31
Abbildung 11: Wellrad Leybold, übernommen aus VP1.2.3.2 Wellrad, von Leybold Didactic GmbH, o. D., www.leybold-shop.de/vp1-2-3-2.html	31
Abbildung 12: Tellurium von Lego, übernommen aus Sonne Erde Mond Modell 42179, von LEGO GmbH, o. D., www.lego.com/de-de/product/planet-earth-and-moon-in-orbit-42179	37
Abbildung 13: Tellurium Phywe, übernommen aus Tellurium, beleuchtet, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/physik/licht-und-optik/lichtausbreitung/tellurium-beleuchtet_17501_19504/	38
Abbildung 14: Tellurium Cornelsen, übernommen aus 31115 Tellurium N, von Cornelsen Experimenta, o. D., www.cornelsen-experimenta.de/shop/de/Grundschule/Sachunterricht/Geographie/31115-Tellurium+N.html	38
Abbildung 15: Kreisbahn aus Lego, eigenes Foto.....	44
Abbildung 16: Zentralkraft Conatex, übernommen aus Zentralkraft-Gerät Versuch, von Conatex GmbH, o. D., www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/zentralkraft-geraet-versuch.html	47

Abbildung 17: Zentrifugalkraft Phywe, übernommen aus Zentrifugalkraft mit Cobra SMARTsense, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/physik/mechanik/kreisbewegung-rotation/zentrifugalkraft-mit-cobra-smartsense_26197_28203/	47
Abbildung 18: Screenshots zur Zentripetalbeschleunigung, eigene Screenshots aus der App Physics Toolbox.....	48
Abbildung 19: x-Weg-Zeit-Diagramm, Darstellung erzeugt mit Viana.NET	48
Abbildung 20: y-Weg-Zeit-Diagramm, Darstellung erzeugt mit Viana.NET	49
Abbildung 21: y-Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm, Darstellung erzeugt mit Viana.NET	49
Abbildung 22: y-Beschleunigung-Zeit-Diagramm, Darstellung erzeugt mit Viana.NET	50
Abbildung 23: Umlenkrolle und Rollwagen aus Lego, eigenes Rendering erzeugt mit Studio 2.0.....	54
Abbildung 24: Rollbahn Phywe, übernommen aus Zweites Newtonsches Gesetz / Rollenfahrbahn mit measure Dynamics, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/versuche-sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/...	55
Abbildung 25: Rollbahn Conatex, übernommen aus Rollenfahrbahn Komplettsset 1,4 m, von Conatex GmbH, o. D., www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html	55
Abbildung 26: Weg-Zeit-Diagramm gleichmäßig beschleunigte Bewegung, Darstellung erzeugt mit Viana.NET.....	56
Abbildung 27: Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm gleichmäßig beschleunigte Bewegung, Darstellung erzeugt mit Viana.NET	57
Abbildung 28: Begriffe, die mit Energie assoziiert werden, übernommen aus Duit (1986, S. 240)	61
Abbildung 29: Energieflussdiagramm, übernommen aus Energieumwandlung, von LEIFIphysik, o. D., www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/grundwissen/energieumwandlung	62
Abbildung 30: Balliste aus Lego, eigenes Foto	63
Abbildung 31: Katapult aus Lego, eigenes Foto	64
Abbildung 32: Dynamo Versuch mit Lego, eigenes Foto	65
Abbildung 33: Energieumwandlung Phywe, übernommen aus Set Schülerversuche Erneuerbare Energie 3 für 10 Versuche, TESS advanced Physik EN-FC, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D., www.phywe.de/versuche-sets/tess-schuelerversuche-sets/set-schuelerversuche-erneuerbare-energie-3-fuer-10-versuche-tess-advanced-physik-en-fc_2408_3339/	66
Abbildung 34: Dynamo Conatex, übernommen aus Handgetriebener Generator DynaMot, von Conatex GmbH, o. D., www.conatex.com/physik-lehrmittel/elektrik/motoren-generatoren/handgetriebener-generator-dynamot/handgetriebener-generator-dynamot.html	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teileliste Hebelversuch, erstellt mit Studio 2.0.....	16
Tabelle 2: Teileliste Flaschenzug, erstellt mit Studio 2.0.....	22
Tabelle 3: Messergebnisse Flaschenzüge.....	25
Tabelle 4: Teileliste Wellrad, erstellt mit Studio 2.0	29
Tabelle 5: Teileliste Rotationsversuch, erstellt mit Studio 2.0.....	44
Tabelle 6: Teileliste gleichmäßig beschleunigte Bewegung, erstellt mit Studio 2.0	54
Tabelle 7: Teileliste Balliste, erstellt mit Studio 2.0	63
Tabelle 8: Teileliste Katapult. erstellt mit Studio 2.0.....	64
Tabelle 9: Teileliste Dynmao, erstellt mit Studio 2.0.....	65

1. Einleitung und Zielsetzung

Fast jede Person, die Physik studiert oder im physikalischen Bereich arbeitet, wird meist nicht nur einmal den folgenden Spruch in ähnlicher Form gehört haben: „Physik? Das studierst du? Ich war immer schlecht in Physik. Das hat keinen Spaß gemacht“. Solche Aussagen schaffen subjektiv das Empfinden, dass das Fach Physik ein Problem hat. Leider überschneidet sich hier subjektives Empfinden und Wirklichkeit. *Naturwissenschaften, Mathematik, Technik – immer unbeliebter?* von Gottfried Merzyn (2008) ist einer von vielen Buchtiteln, die sich mit der Unbeliebtheit von naturwissenschaftlichem und insbesondere dem physikalischen Unterricht beschäftigen. Zusätzlich gibt es passend hierzu zahlreiche Studien, die sich mit der Beliebtheit des Physikunterrichts beschäftigen, da die Ablehnung gegenüber diesem Schulfach sich bis in das Erwachsenenalter hineinzieht, welches zu Problemen sowohl in Hochschulen als auch Industrie und Wirtschaft führt (Merzyn, 2008, S. 5). Das Schlagwort „Fachkräftemangel“ trifft hier leider auch zu.

Wenn man eine Befragung des Instituts für Jugendforschung von 2004 betrachtet, ergibt sich für die Beliebtheit von Schulfächern ein deutlicher letzter Platz für das Fach Physik (Merzyn, 2008, S. 7). Als Mensch, der dieses Fach studiert und die Absicht hat Physik zu unterrichten, muss man sich nun auf die Suche nach dem begeben, was das Interesse und die Beliebtheit des Faches ändern kann. Merzyn beschreibt in einer Auswertung von Umfragen, dass *Alltagsbezug*, *Realitätsbezug* und *Phänomene* immer wieder auftauchen, wenn es darum geht, was ein Interesse der Lernenden und die Beliebtheit eines Faches ausmachen (Merzyn, 2008, S. 43). Passend hierzu ist die beliebteste Tätigkeit der Schülerinnen und Schüler¹ im Physikunterricht das Experimentieren (Merzyn, 2008, S. 54). Hierbei ist zu erwähnen, dass Experimente im Chemieunterricht beliebter sind als in der Physik (Merzyn, 2008, S. 56). Dies mag einerseits daran liegen, dass die chemischen Experimente hier mehr rauchen, zischen und knallen, andererseits aber weil der Eigenanteil der Schülerinnen und Schüler bei physikalischen Experimenten sehr gering sein

¹ In Anlehnung an die Weisung des Landes Hessen wird auf gendergerechte Kurzformen verzichtet. Stattdessen wird durchgehend die Formulierung „Schülerinnen und Schüler“ verwendet. Hiermit werden ausdrücklich alle Geschlechter, auch nicht-binäre und diverse Personen gemeint.

kann. Wilfried Suhr (2010) schrieb hierzu „Die genaue Lenkung [...] lässt kaum noch Handlungsspielraum für eigene Erfahrungen offen, so dass sich die Frage stellt, ob Schüler aus solchen Versuchen überhaupt noch mehr Gewinn ziehen können als aus gleichartigen Versuchen, die man ihnen als Film vorführt“ (Suhr, 2010, S. 14). Lehrmittelfirmen bieten zwar technisch gute Experimente an, diese sind jedoch oft stark auf ein Ergebnis fokussiert und teils nicht vielseitig anwendbar. Das technische und auf Funktionalität ausgelegte Design der einzelnen Versuchskomponenten schafft hier das Gefühl, dass die Experimente nicht nur inhaltlich fern vom normalen Leben sind (Merzyn, 2008, S. 84). Hinzu kommen immense Kosten, die durch die Pauschbeträge, die in Hessen 31,90 € pro Schülerin und Schüler betragen, getragen werden müssen (Hessisches Kultusministerium, 2018, S. 1087). Das Hauptproblem hierbei ist, dass sich alle Fächer diese Beträge teilen. Bei einer Schule im Aufbau werden hier zusätzliche Mittel bereitgestellt, die ohne Ausschreibung 10.000 € pro Schuljahr im Fach Physik betragen (Hessisches Kultusministerium, 2018, S. 1089). Dies sorgt dafür, dass viele Experimente in Physiksammlungen überaltert, nicht mehr funktionsfähig oder nicht mehr vollständig sind.

Eine mögliche Lösung kann unter Umständen ein dänischer Spielzeughersteller liefern. Lego wird unter dem Namen Lego Education schon erfolgreich in Grundschulen und an weiterführenden Schulen im Nawi-Unterricht verwendet, wie zum Beispiel an der Leibnizschule in Frankfurt. Hierzu gibt es spezielle Experimentierkästen samt Fortbildungen für Lehrerinnen und Lehrer. Wenn man nach möglichen Experimenten für höhere Klassenstufen sucht, insbesondere für den gymnasialen Physikunterricht, so stößt man zurzeit leider noch auf Leere.

Mit dieser Wissenschaftlichen Hausarbeit mit dem Titel *Entwicklung von physikalischen Experimenten mit Lego* wird dazu beigetragen, diese Lücke teilweise zu schließen. Hierzu werden zuerst allgemeine Grundlagen zum Experimentieren sowie der Einsatz von Spielzeug im Physikunterricht behandelt. Anschließend wird Lego vorgestellt und erörtert, ob dieses grundsätzlich als Lehrmittel geeignet sein kann. Der Hauptteil der Hausarbeit handelt von der Umsetzung der Experimente. Hierbei wird aufgrund von physikalischen Hintergründen und didaktischen Überlegungen ein Experiment, das aus Lego-Bauteilen besteht (bis auf eine Ausnahme), komplett eigenständig

entwickelt. Für ein mögliches Nachbauen und Anwenden in der Schule oder Universität sind Teilelisten erstellt worden. Im Anhang befinden sich Bauanleitungen zu den vorgestellten Experimenten. Diese Experimente werden, falls vorhanden, mit existierenden Versuchen von Lehrmittelherstellern verglichen. Dieser Vergleich findet unter anderem über die Ergebnisse, Handhabbarkeit aber auch über die preisliche Gestaltung statt, um das eben angesprochene Finanzierungsproblem zu verdeutlichen.

Am Ende dieser Hausarbeit soll eine anwendbare und überschaubare Sammlung an physikalischen Experimenten stehen, die mittels Lego umgesetzt wurden. Sie soll als Impuls für die Leserinnen und Leser dieser Hausarbeit dienen, die Experimente selbst anzuwenden und selbstständig weitere Experimente mit Lego zu entwickeln oder entwickeln zu lassen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Das Experiment

Das Experiment gibt es nicht nur im naturwissenschaftlichen Unterricht, sondern auch in der wissenschaftlichen Forschung, wobei hier oft die Zielsetzungen unterschiedlich sind. Statt für die Wissenschaft neue Entdeckungen zu tätigen versucht man in der Schule nachzuvollziehen und nachzuentdecken (Mikelskis-Seifert, 2007, S. 29). Diese Formulierung ist aus Sicht einer Person, die den zu entdeckenden Zusammenhang schon kennt, nachvollziehbar. Für Schülerinnen und Schüler ist ein Experiment jedoch auch ein Vorgang des Erkennens von, für sie, völlig neuen Zusammenhängen und Phänomenen. Dies wird durch Girwidz (2015, S. 228) in einer Aussage verdeutlicht: „Aus didaktischer Sicht sind Versuche ein Mittel, um physikalische Phänomene zu veranschaulichen und physikalische Vorstellungen aufzubauen“. Die erkenntnistheoretische Funktion sollte man hierbei im Physikunterricht nicht überbewerten, da allgemeingültige Theorien nicht durch ein einziges Experiment bewiesen werden können und im Umkehrschluss eine Beobachtung nicht eine Gesetzmäßigkeit für die Allgemeinheit entwickeln kann (Mikelskis-Seifert, 2007, S. 30).

Nach Merzyn (2008, S. 54) haben über beinahe 60% der Schülerinnen und Schüler ein sehr großes oder großes Interesse am Durchführen von Versuchen. Bei knapp unter 50% befindet sich dieser Wert für das Beobachten von Versuchen. Diese gewählte Unterteilung basiert auf der klassischen Unterteilung der Ausführungsform von Experimenten. Man spricht hierbei von Demonstrationsversuchen, die von Lehrerinnen und Lehrern durchgeführt werden, oder von Schülerversuchen, bei denen die Schülerinnen und Schüler die Experimentierenden sind.

Insbesondere Schülerexperimente sollen laut Girwidz (2015, S. 240) neben dem Erkenntnisgewinn noch weitere Ziele verfolgen:

- „Der Erwerb experimenteller Fähigkeiten und fachspezifischer Arbeitsweisen“
- „Erkennen und Verstehen physikalischer Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge in der Anwendung und bei der direkten Begegnung mit dem Phänomen“
- „Verbindung von Theorie und Praxis“
- „Entwicklung sozialen Verhaltens und Partner- und Gruppenarbeit (Kooperations- und Kommunikationsfähigkeit)“
- „Motivation und Werterhaltung (Freude an der Physik, präzises zielstrebiges Arbeiten, Ausdauer)“

Wilfried Suhr (2010, S. 11) erweitert diese Liste mit handwerklichem Geschick, Improvisationstalent, Frustrationstoleranz, Aufmerksamkeit und Sorgfalt. Beide Autoren stellen somit klar, dass ein Experiment eine vielschichtige Methode ist, die über rein fachliche Komponenten hinaus geht. Gerade deshalb sollten Experimente gewählt werden, die für die Schülerinnen und Schüler in ihren Alltag integrierbar sind und nicht mit perfekt aufeinander abgestimmten Komponenten vollzogen werden (Suhr, 2010, S. 13-14).

Im Kerncurriculum wird das Experimentieren verschiedenen Kompetenzbereichen zugeordnet. Hierzu zählen „Erkenntnisgewinnung“, „Kommunikation“ und „Bewertung“ (Hessisches Kultusministerium, 2024; Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024). Die verschiedenen Kompetenzbereiche, die durch das Experimentieren abgedeckt

werden sowie die starke Integration in die Kerncurricula unterstreicht den Stellenwert von Experimenten im Physikunterricht.

Gegenstände, die oft physikalisch interessante Phänomene innehaben können und gleichzeitig der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler entspringen, sind Spielzeuge.

2.2 Spielzeug im Physikunterricht: Lego

Spielzeuge sorgen dafür, dass Schülerinnen und Schüler nicht den Eindruck haben, in eine völlig fremde Welt der Physik einzutauchen, was zugleich den Unterricht interessanter macht und bei den Lernenden zu einer erhöhten Motivation führt (Berge, 1982, S. 11). Dabei ist zu unterscheiden, dass Spielzeug als solches physikalisch erklärt werden kann, wie zum Beispiel eine Marmelbahn oder aber mit Spielzeug physikalische Versuche aufgebaut werden können. Idealerweise entwickeln sich hierbei physikalische Probleme aus der Spielsituation (Berge, 1982, S. 14). Besonders geeignet sind hierfür Konstruktionsspielzeuge. Diese werden in didaktischen Werken oft für das freie Experimentieren verwendet, wobei sich die Lehrperson bei Vorgaben auf ein Minimum beschränkt (Kircher, 2015, S. 386). Hierbei entstehen Situationen, in denen die Schülerinnen und Schüler einen mit „physikalisch-technischen Ideen [...], überraschenden Fragen und Antworten, mit Motivation und Spaß“ beschenken (Kircher, 2015, S. 386). Dies kann ich aus eigener Erfahrung bestätigen, da ich seit mehreren Jahren Robotik-Arbeitsgemeinschaften leite, in denen mit Lego Spike, einem programmierbaren Roboter, gearbeitet wird. Die Schülerinnen und Schüler bringen regelmäßig Ideen, Entdeckungen und Fragen vor, die im freien Arbeiten an ihren Projekten entstehen. Nicht selten sorgt dies für spannende Momente, in denen teils auch jüngere Schülerinnen und Schüler Interesse an physikalischen Zusammenhängen zeigen.

Da Spielzeuge „einen geeigneten und reizvollen Zugang zur Physik bilden [...] und preisgünstiger sind als die meisten Geräte von Lehrmittelfirmen“ (Kluge, 1973, S. 6), bietet es sich an, das Spielzeug nicht nur als solches zu betrachten, sondern als unter Umständen vollwertigen Ersatz von den herkömmlichen teuren Experimenten.

Ein Spielzeug, das fast jede Person kennt, gut zum Konstruieren ist und eine enorme Beliebtheit in allen Altersschichten besitzt, ist Lego. Lego ist vor allem durch die klassischen Klemmbausteine bekannt. Der Firma Lego ist es unter anderem durch viele Lizenzprodukte gelungen, 2023 der größte Spielzeughersteller der Welt zu sein (Statista, 2024). Diese Bekanntheit kann für den Physikunterricht genutzt werden, um einerseits die Motivation zum Experimentieren zu fördern und andererseits die Möglichkeit zu bieten, zu Hause weiter zu experimentieren. Das Ablösen von den geglätteten und standardisierten Experimenten hin zu selbst zusammengebauten Aufbauten, schafft eine neue Möglichkeit, die Physik erlebbar zu machen. Hierfür ist besonders eine Sparte von Lego geeignet, die Lego Technic heißt. Bei Technic-Bauten werden weniger klassische Klemmbausteine verwendet, sondern Stangen, Balken (Liftarme), Pins, Pneumatik, Motoren, Verbinder, Zahnräder, Kardangelenke und fast alles, was man sich an technischen Elementen vorstellen kann. Hierdurch sind teils sehr hochwertige und vor allem stabile Konstruktionen möglich. Lego Technic wird auch bereits an Universitäten in Experimenten verwendet, wie zum Beispiel bei *myphotonics* der Universität Osnabrück (Universität Osnabrück, o.D). In Schulen ist Lego durch Lego Mindstorms und Spike sowie Kästen für den Nawi-Unterricht schon weit verbreitet. Dies ist vor allem durch hohe Standards für Produktsicherheit und Qualität der Elemente möglich, was sich auch in der Robustheit von Lego zeigt. Dies macht Lego zu einem idealen Unterrichtsmaterial, für das sich auf einfachem Wege kostengünstige Ersatzteile beschaffen lassen. Es sei hinzuzufügen, dass es auch andere Klemmbausteinhersteller gibt, die aber noch nicht die Bandbreite an Technic-Elementen vorzeigen können, wie Lego. „Fakes“, die nicht zu anderen Klemmbaustein-Herstellern zu zählen sind, sind nur mit Vorsicht zu verwenden und sollten im Vorfeld getestet werden, damit keineswegs Schadstoffe oder gefährliche Produkte in die Hände von Schülerinnen und Schülern gelangen. Ein weiterer Vorteil von Experimenten mit Lego ist, dass Lego-Elemente vielseitig einsetzbar sind und somit potenziell in verschiedenen Experimenten Anwendung finden können, was eine Kostenersparnis mit sich bringen kann.

Ob Lego-Versuche in größerem Umfang die Produkte von Lehrmittelherstellern ersetzen können, gilt es zu klären.

3. Experimente

Im Folgenden werden die entwickelten physikalischen Experimente mit Lego vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird zuerst auf den physikalischen Hintergrund eingegangen. Dieser ist nicht zwangsläufig auf das schulische Niveau des Versuchs angepasst. Im Anschluss werden didaktische Überlegungen angestellt, in denen der Versuch eingeordnet und auf das Wesentliche reduziert wird. Es wird hier formuliert, was mit dem Versuch erkundet werden soll.

Bei der Integration von Lego werden der fertige Aufbau und eine Teileliste tabellarisch gezeigt. In dieser Tabelle sind die Bricklink-ID (BLID) und eine EID angegeben, da nicht alle Teile beides haben. Der Partname gibt den Namen im Lego-Jargon an, wohinter die Anzahl der jeweils benötigten Teile steht. Die Tabelle kann dazu verwendet werden die Teile nachzukaufen, um den Versuch nachzustellen. Zusätzlich wird in diesem Abschnitt auf mögliche Besonderheiten beim Bau hingewiesen und ob zusätzliche Hilfsmittel benötigt werden. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Versuche vorgestellt und ein Vergleich mit bestehenden Experimenten von Lehrmittelherstellern gezogen. Der Vergleich erfolgt zum Teil über die Ergebnisse, aber auch über den jeweiligen Gesamtpreis. Die Preise der Versuche von Lehrmittelherstellern wurden über deren Webseiten recherchiert und zum Stand der Erstellung dieser Hausarbeit inklusive Mehrwertsteuer und ohne Berücksichtigung möglicher Rabatte angegeben. Für die Lego-Versuche wurde der Preis bei selbstentwickelten Experimenten über die Plattform Bricklink ermittelt. Hierbei wurden Farben der Teile ignoriert und der Gebraucht-, als auch der Neupreis der Steine berücksichtigt. An dieser Stelle sei anzumerken, dass es von Vorteil sein kann, Pins und Achsen als neuwertige Ware zu kaufen, da diese mit der Zeit und vermehrter Benutzung an Haltkraft verlieren können. Die Preise können sich nach Erstellen dieser Hausarbeit verändern. Die Recherche erfolgte im Zeitraum von März-April 2025. Eine Einzelquellenangabe bei jeder Preisnennung wurde im Sinne der Lesbarkeit bewusst vermieden.

Jedes Experiment wird im Anschluss reflektiert, insbesondere auf mögliche Verbesserungen oder Handhabungshinweise.

Die entsprechenden Anleitungen zu den Experimenten befinden sich im Anhang. Diese wurden mit Hilfe des Programms Studio erstellt. Studio ist eine Umgebung, in der man digital Lego-Modelle bauen kann. Das Programm ist über Bricklink zu downloaden und gehört – wie auch Bricklink selbst - zur Lego Group.

3.1 Experiment zum zweiseitigen Hebel

3.1.1 Physikalischer Hintergrund

Hebel kommen in der Welt überall vor. Sei es in unserem Körper in Form von Knochen und Gelenken, in mechanischen Hilfsmitteln, wie der Brechstange, der Schere oder auf Spielplätzen. „Die Hebelgesetze sind bereits vor Archimedes bekannt gewesen“ (Simonyi, 2004, S. 90). Es haben sich also schon seit Jeher Menschen mit den zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten beschäftigt. Durch die Allgegenwärtigkeit können am Hebel leicht die Grundprinzipien der Mechanik betrachtet und Gleichgewichte, Drehmomente und die Wirkung von Kräften mit Hilfe des Hebels veranschaulicht werden

Der Hebel gehört in der Schulphysik zu den „einfachen Maschinen“, die oft auch als „Kraftwandler“ tituiert werden. Da Kräfte Vektorgrößen sind, besitzen sie einen Betrag und eine Richtung (Halliday, Resnick & Walker, 2009, S. 103) sowie einen Angriffspunkt. Diese Größen nennt man Bestimmungsgrößen. Kraftwandler können eine oder mehrere dieser Größen für den Anwender ändern. Ein Hebel zählt zu diesen Kraftwandlern, da hier der Angriffspunkt und die Kraftrichtung verändert werden sowie unter Umständen auch der Betrag, wenn die Voraussetzungen durch das Hebelgesetz erfüllt sind.

Eben dieses Hebelgesetz leitet sich durch die wirkenden Drehmomente ab:

Existiert ein Körper, der um eine Achse O rotieren kann und es wirkt eine Kraft $\vec{F}$ im Punkt P, dessen Position relativ zu O mit $\vec{r}$ beschrieben werden kann, so kann ein Drehmoment mit

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot \vec{r} \cdot \sin(\alpha) \quad (1-1)$$

beschrieben werden. Wobei α der Winkel zwischen $\vec{F}$ und $\vec{r}$ ist. Stehen diese beiden Vektoren senkrecht aufeinander, so ergibt sich:

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot \vec{r} \quad (1-2)$$

(Halliday et al., 2009, S. 303).

Ein zweiseitiger Hebel ist meist eine Stange, die in ihrer Mitte um einen Punkt rotieren kann. $\vec{r}$ wird hier auch als die Länge des Hebelarms bezeichnet. Ein statisches Gleichgewicht stellt sich dann ein, wenn sich die Drehmomente auf beiden Seiten aufheben. Es muss also gelten:

$$\vec{M}_{links} = \vec{M}_{rechts} \quad (1-3)$$

$$\vec{F}_l \cdot \vec{r}_l = \vec{F}_r \cdot \vec{r}_r \quad (1-4)$$

3.1.2 Didaktische Überlegungen

Kraftwandler sind Thema in der Sekundarstufe 1, eingebettet in das Thema „Technik im Dienst des Menschen“ (Hessisches Kultusministerium, 2024, S. 35). Die meisten Schülerinnen und Schüler werden aus ihrem Alltag schon mehrere Hebel kennen, auch wenn diese nicht als solche benannt wurden. Für den zweiseitigen Hebel bietet sich als Alltagsbezug das Beispiel der Wippe an. Hierdurch gibt es oft schon Vorwissen, das mit unterschiedlichem Gewicht der Spielenden und der Sitzposition auf der Wippe zusammenhängt. Durch diese Vorkenntnisse kann das Experiment mit vorhandenen Begriffen erklärt werden. Die Gewichtskraft sollte schon bekannt sein, wenn die Einführung des Hebelgesetzes bevorsteht. Sie ist mit dem Gewicht der Wippenden zu vergleichen. Das weiter innen und außen Sitzen auf der Wippe ist im Verlauf durch den Begriff der Länge des Hebelarms zu ersetzen.

Mathematisch kann das Hebelgesetz experimentell durch einfache Verhältnisse dargestellt werden. Es kann mit einem Gleichgewicht veranschaulicht werden, indem zwei gleiche Gewichte im gleichen Abstand an die Hebelarme gehängt werden. Daraufhin kann eines der Gewichte verdoppelt werden, wonach die Schülerinnen und Schüler herausfinden sollen, was mit dem zweiten Gewicht geschehen muss, um ein Gleichgewicht zu erzielen. Durch einfache Verhältnisse

kann am Anfang das Prinzip des Hebelgesetzes intuitiv aufgezeigt werden. Im Laufe des Experiments können Erweiterungen stattfinden, wie zum Beispiel der Einsatz von mehreren Gewichten an unterschiedlichen Positionen.

Wichtiges Ziel dieses Experiments ist das qualitative Verstehen, wie Hebelarme und Gewichtskräfte am zweiseitigen Hebel zusammenhängen. Dass Kräfte sich unterscheiden können, ist den Schülerinnen und Schülern zum Zeitpunkt des Experiments meist schon bewusst. Dass jedoch der Abstand zur Drehachse entscheidend ist, stellt in der Regel eine neue Erkenntnis dar. Der Begriff des Statischen Gleichgewichts und eine mögliche Einführung des Drehmoments sind ebenfalls fachliche Lernziele.

3.1.3 Integration von Lego



Abbildung 1:
Hebelversuch mit Lego,
eigenes Rendering erzeugt mit Studio 2.0

Tabelle 1:
Teileliste Hebelversuch,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
2780	6279875	Technic, Pin with Short Friction Ridges	7
4265c	4110050	Technic Bush 1/2 Smooth	9
32278	4142292	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	3
32525	4156152	Technic, Liftarm Thick 1 x 11	1
32526	4155459	Technic, Liftarm, Modified Bent Thick L-Shape 3 x 5	1

3705	370526	Technic, Axle 4L	1
3707	370726	Technic, Axle 8L	6
3713	6271820	Technic Bush	6
39790	6295161	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 11 x 15 Open Center	1
40490	6001831	Technic, Liftarm Thick 1 x 9	3
6558	655826	Technic, Pin 3L with Friction Ridges	1

Das Experiment ist mittels einfachster Lego Technic-Teile aufzubauen. In **Abbildung 1** ist der vorgeschlagene Aufbau zu sehen, der ebenfalls in der Anleitung zu finden ist. Hierbei können Liftarme als Gewichte verwendet werden, wodurch eine vollständige Lego-Integration vollzogen wird. Die breite Basis gibt einen sicheren Stand, insbesondere dadurch, dass der Schwerpunkt des Aufbaus in das Zentrum des Fußes hineinragt. Achsen als Aufhängung der Gewichte sind zu empfehlen, da man hier ohne starkes Ziehen und Drücken die Gewichte aufsetzen und wieder abnehmen kann. Zusätzlich sorgen sie für ein reibungsarmes Schwingen. Als Alternative kann man auch Pins verwenden, die keine Reibungsnoppen besitzen. Wie man auf **Abbildung 1** erkennt, bestehen zahlreiche Möglichkeiten, an welcher Stelle der Hebelarme man die Gewichte anbringen kann. Hierbei können die Schülerinnen und Schüler spielend experimentieren und zusätzlich eigene Gewichte aus einem Fundus an Steinen bauen. Ein Erweitern in die Höhe sowie die Breite ist möglich. Wenn man eine Kraft messen möchte, so können selbstverständlich Federkraftmesser oder auch die bestehenden Gewichte von Lehrmittelherstellern an die Achsen angehängt werden.

3.1.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten



Abbildung 2:
Hebel Phywe,
übernommen aus *Hebel*, von PHYWE Systeme
GmbH & Co. KG, o. D.,
https://www.phywe.de/physik/mechanik/stoff-materialeigenschaften/hebel_689_1620/



Abbildung 3:
Einseitiger Hebel Phywe,
übernommen aus *Einseitiger Hebel*, von PHYWE
Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
www.phywe.de/versuche-sets/schuelerversuche/einseitiger-hebel_9695_10626/

Der Gebrauchtpreis des Experimentes mit Lego liegt pro Versuchseinheit bei 3,89 €. Mit neuen Teilen beträgt der Preis 5,65 €.

Zum Vergleich kostet allein der Hebel (**Abbildung 2**) zum Aufbau einer Schülerbalkenwaage von Phywe (Artikelnummer² 03960-00) 39,27 €. Möchte man den Hebel mit Standkonstruktion (**Abbildung 3**) erwerben, kostet dies im Set Einseitiger Hebel (Art.-Nr. P1000700) 212,65 €. Hierbei sind dann auch Gewichte und ein Federkraftmesser enthalten.

Der Hebel von Phywe bietet ebenfalls viele Positionen an, an denen man Gewichte anhängen kann. Durch die kurzen Haltenoppen fallen diese jedoch häufig im Unterricht ab, wodurch die Frustration bei den Schülerinnen und Schülern steigt. Ein weiterer Störfaktor ist die geringe Flexibilität der kurzen Noppen. Für die Gewichte der Firma Phywe reichen diese aus. Möchte man aber ein anderes Objekt hieran befestigen, ist man leicht durch die Größe limitiert. Die Haltebolzen (Art.-Nr. 03949-00), mit denen der Hebel beweglich an das Stativ angebracht wird, werden mit der Zeit leider immer weniger und verschwinden. Dieser schlägt mit 11,07 € regelmäßig zu Buche.

² Art.-Nr. steht im Folgenden für Artikelnummer.

Ein Vorteil beim Set von Phywe ist, dass bereits eine Federwaage (Art.-Nr. 03065-03) im Wert von 22,73 € enthalten ist.

3.1.5 Reflexion und Optimierung

Der Versuch mit Lego ermöglicht alles, was der Versuch von Phywe auch verspricht, um sich mit dem Hebelgesetz zu befassen. Die höhere Flexibilität bietet den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit, spielerischer die Physik zu erfahren. Das eigene Bauen von Gewichten sorgt für eine bessere Nachvollziehbarkeit des Versuchs, da manche Schülerinnen und Schüler mit den vorgegebenen Gewichten nur schwerlich intuitiv arbeiten können. Kreativität und Spaß werden hierbei stärker geweckt als bei den vorgegebenen Gewichten von Phywe. Hinzu kommt beim Phywe-Experiment, dass die Teller, auf denen die Gewichte aufliegen, oft kaputt gehen, da diese nur festgekrimpt sind. Ein Vorteil dieser Gewichte ist eine direkte Ablesbarkeit der Massen. Für einen größeren Hebel sowie höhere Gewichte empfiehlt es sich beim Lego-Experiment, die Basis und die Hebelarme stabiler zu bauen. Eine mögliche Erweiterbarkeit ist aber durchaus gegeben. Ein Federkraftmesser und Gewichte sind für Messungen, die über ein reines Verhältnis hinausgehen, essenziell und müssen dazugekauft werden. Der Versuchsaufbau als solcher kann qualitativ erfahrbar machen, wie Hebelarme und Gewichtskräfte zusammenhängen. Für einen Bruchteil des Preises ist es mit Lego gleichzeitig möglich, mehr Schülerinnen und Schülern ein eigenes vollwertiges Experiment zur Verfügung stellen, was sogar in manchen Belangen dem Material der Lehrmittelfirmen überlegen ist.

3.2 Experiment zum Flaschenzug

3.2.1 Physikalischer Hintergrund

Flaschenzüge werden seit der Antike genutzt, um schwere Lasten anzuheben. Insbesondere bei Bauvorhaben und in der Seefahrt fanden sie schon früh Anwendung und werden bis heute weiterhin genutzt. Mit der Hilfe von

Flaschenzügen können erstaunliche Lasten bewegt werden und mit ihnen kann man den Zusammenhang zwischen Kraft, Weg und Arbeit direkt erlebbar machen.

Der Flaschenzug zählt, wie auch der Hebel, zu den „einfachen Maschinen“ (Kultusministerium, 2014, S. 25) und gehört zu den Kraftwandlern. Hier gilt ebenfalls, dass er den Angriffspunkt und den Betrag ändert. Die Zug- und Wirkrichtung der Kraft können, aber müssen sich nicht unterscheiden.

Der Flaschenzug ist ein anschauliches Beispiel für die „Goldene Regel der Mechanik“, die auf Galileo Galilei zurückgeht. Sie besagt, dass der verringerte Aufwand an Kraft durch eine Verlängerung des Weges erkaufte wird.

Für den Flaschenzug, mit dem man eine Masse senkrecht nach oben zieht, gilt für die Energiedifferenz von Höhe $\vec{h}_0$ zu Höhe $\vec{h}_1$:

$$\Delta E_{pot} = m \cdot \vec{g} \cdot (\vec{h}_1 - \vec{h}_0) \quad (2-1)$$

Diese Energiedifferenz wird auch als Arbeit W bezeichnet, die man verrichten muss, um die Masse auf eine höhere potentielle Energie zu bringen. Da für die Last

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g} = \vec{F}_L \quad (2-2)$$

gilt, kann man die Formel für die Arbeit, unter der Annahme, dass man die Masse um eine Strecke

$$\vec{s}_L = \vec{h}_1 - \vec{h}_0 \quad (2-3)$$

anhebt wie folgt formulieren:

$$W = \vec{F}_L \cdot \vec{s}_L \quad (2-4)$$

Die Kraftersparnis beim Flaschenzug ergibt sich durch die Anzahl n der tragenden Seile, die bei einem Anheben der Masse um $\vec{s}_L$, jedes für sich, ebenfalls um $\vec{s}_L$ verkürzt werden müssen. Es ergibt sich somit für die Länge $\vec{s}_Z$ des Seils, an dem man zieht:

$$\vec{s}_Z = n \cdot \vec{s}_L \quad (2-5)$$

Da die Arbeit, die verrichtet wird, gleich bleibt gilt nach (2-4) und (2-5):

$$\vec{F}_L \cdot \vec{s}_L = \vec{F}_Z \cdot \vec{s}_Z \quad (2-6)$$

$$\vec{F}_L \cdot \vec{s}_L = \vec{F}_Z \cdot n \cdot \vec{s}_L \quad (2-7)$$

$$\frac{\vec{F}_L}{n} = \vec{F}_Z \quad (2-8)$$

3.2.2 Didaktische Überlegungen

Flaschenzüge sind, wie auch der Hebel, für die Sekundarstufe 1 im Thema „Technik im Dienst des Menschen“ (Hessisches Kultusministerium, 2024) vorgesehen. Falls die Schülerinnen und Schüler nicht schon in der Experimenta Frankfurt waren, werden die wenigsten aktiv einen Flaschenzug bedient haben. Im Alltag gesehen und auch genutzt haben ihn vermutlich schon viele. Als Beispiele dienen hier Kräne, Aufzüge und die Aufhängung von Segeln bei Schiffen. Wichtig hierbei ist, dass man, bevor man den Flaschenzug einführt, schon im Unterricht über eine Umlenkrolle als Kraftwandler gesprochen hat. Hiermit wird eine klare Abgrenzung vom Flaschenzug ermöglicht. Die Umlenkrolle wandelt zwar den Angriffspunkt und die Richtung der Kraft, jedoch nicht den Betrag.

Das Prinzip der Goldenen Regel der Mechanik ist durch das Ziehen am Seil sehr anschaulich zu verdeutlichen. Es bietet sich an sowohl die Strecke, um die man eine Masse anheben möchte, als auch das gezogene Seilstück abzumessen. Durch das Spüren der Kraft, die aufgebracht werden muss, haben die Schülerinnen und Schüler einen Moment des Erfahrens. Für dieses Erleben müssen nicht zwangsläufig Messungen vorgenommen werden, sie können aber hilfreich sein, insbesondere zur Verdeutlichung der Strecke.

Sprachlich können, falls noch nicht eingeführt, Begriffe wie Arbeit oder Energieerhaltung vermieden werden, um alltagsnahe Formulierungen beizubehalten und eine kognitive Überforderung zu vermeiden.

Für Messungen werden Gewichte benötigt, die entweder vorgegeben sind oder abgewogen werden können sowie ein Federkraftmesser, um die Zugkraft zu bestimmen. Alternativ kann man auch ein im Verhältnis passendes Gewicht als „Zuggewicht“ verwenden.

Um die Freiheitsgrade des Experiments gering zu halten, wird wieder nur statisch gemessen und ein idealisiertes System ohne Reibung betrachtet.

Das Ziel des Experiments ist es, ein Verständnis über Flaschenzüge sowie der Goldenen Regel der Mechanik zu erlangen oder zu vertiefen. Hierzu zählen auch die Zusammenhänge von Zugkraft und Gewichtskraft der Last sowie der Verlängerung der Zugstrecke im Verhältnis zur Höhendifferenz, die von der Masse zurückgelegt wird.

3.2.3 Integration von Lego



Abbildung 4:
Flaschenzug aus Lego,
eigenes Rendering erzeugt mit Studio 2.0

Tabelle 2:
Teileliste Flaschenzug,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
13971		Wheel 18mm D. x 8mm with Fake Bolts and Deep Spokes with Inner Ring	4
32009	6271155	Technic, Liftarm, Modified Bent Thick 1 x 11.5 Double	4
32073	4114740	Technic, Axle 5L	4
32278	4542578	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	6
32524	4495931	Technic, Liftarm Thick 1 x 7	2
3706	4121690	Technic, Axle 6L	3
3713	6275844	Technic Bush	16
40490	4645730	Technic, Liftarm Thick 1 x 9	3

42003	6273715	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular 3L with 2 Pin Holes	2
43093	4206482	Technic, Axle 1L with Pin with Friction Ridges	4
4459		Technic, Pin with Long Friction Ridges	12
6536	6261375	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular	4
6558	655826	Technic, Pin 3L with Friction Ridges	6

Ein Seilzugexperiment benötigt eine ausreichende Stabilität und gleichzeitig genügend Freiraum, in dem sich die Seile sowie die Last bewegen können. Die benötigte Stabilität sorgt bei diesem Experiment dafür, dass der Versuchsaufbau etwas komplizierter ist als der des Hebelexperiments. Als Basis dienen gebogene Liftarme, die mit Hilfe einer Schraubzwinge oder Klemme an den Tisch befestigt werden können. Der Flaschenzug kann auch über die Tischkante hinausragen, damit die Last an der Tischkante vorbei abwärts hängen kann. Dies sorgt für einen längeren Weg der Last. Auf der Seite der Rollen sind aus diesem Grund die unteren Liftarme auf der Außenseite des Trägers befestigt.

Als Rollen dienen Felgen für Lego-Räder. Hier wurden explizit die Felgen mit der ID 13971 verwendet, da diese eine tiefe, schmale Rille besitzen, bei denen das Seil nicht über den Rand verrutschen kann. Die schmale Bauart der Felgen sorgt zum einen dafür, dass das Seil nicht unaufhörlich in der Rille verrutscht, zum anderen aber auch für eine möglichst kompakte Konstruktion. Hierdurch kann an Teilen und Bauaufwand gespart werden. Ein nebeneinander Anordnen sorgt dafür, dass sich das Seil nicht verknotet. Für die losen Rollen wurde eine simple Konstruktion mit zwei versetzten Rollen und einer Aufhängung für Gewichte verwendet. Die Rollen sind versetzt angeordnet, damit auch hier die Seile nicht aneinanderreiben. Oft wird dies durch Verwendung unterschiedlich großer Rollen gelöst, was hier jedoch nicht nötig ist. Mehr hierzu im Vergleich mit existierenden Versuchen.

Ein wichtiger Hinweis sei hier nochmals, dass beim Einbau von frei beweglichen Teilen, die Technic-Achsen nicht mit aller Kraft zusammengedrückt werden dürfen, da sonst kein reibungsarmes Rollen der Felgen und Achsen möglich ist!

Ein Erweitern um beliebig viele Rollen ist möglich, jedoch werden hierfür zusätzliche Teile und eventuell eine stabilere Konstruktion benötigt.

Als zusätzliche Bauteile benötigt man einen stabilen Faden sowie einen Federkraftmesser, eine Tischklemme oder eine Schraubzwinge und Gewichte.

3.2.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten



Abbildung 5:
Flaschenzug mit 4 Rollen,
übernommen aus *Flaschenzug mit 4 Rollen*, von
PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
www.phywe.de/physik/mechanik/dynamik-bewegung/flaschenzug-mit-4-rollen_449_1380/



Abbildung 6:
Flaschenzug mit Ständer,
übernommen aus *Flaschenzug mit 4 Rollen*, von
PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
www.phywe.de/versuche-sets/schuelerversuche/flaschenzug-mit-4-rollen_9692_10623/

Der Gebrauchtpreis des Experiments mit Lego liegt pro Versuchseinheit bei 10,10 €. Mit neuen Teilen beträgt der Preis 35,96 €.

Zum Vergleich ruft Phywe (**Abbildung 5**) für einen Flaschenzug mit vier Rollen (Art.-Nr. 02265-00) einen Preis von 51,17 € auf. Wenn man diesen mit Ständer und Befestigungsrollen (**Abbildung 6**) erwerben möchte, so kostet dies 260,25 € (Art.-Nr. P1001100). Hierbei sind ebenfalls ein Federkraftmesser und Gewichte enthalten, welches wie bereits beim Hebel-Set von Phywe einen gewissen Komfort bietet.

Das Experiment von Phywe hat im Unterricht leider schon einige Schwächen aufgezeigt, auf die ich hier gerne eingehen und diese mit dem Lego-Experiment vergleichen möchte. Wenn man, zusätzlich zu der auf der **Abbildung 6** dargestellten Kraftmessung, einen Zusammenhang zwischen der Zugstrecke und den tragenden Seilen darstellen möchte, dann ist der Aufbau des Experiments von Phywe sehr instabil am Rand eines Tisches aufzustellen. Man könnte dies auch mit Hilfe einer Schraubzwinge oder Tischklemme lösen. Das hohe Gewicht der Eisenstangen sowie der Klemmen am oberen Teil der Stangen sorgen für einen hohen Schwerpunkt, weshalb das Experiment trotz allem zu kippen droht,

wenn man es nicht sehr fest an den Tisch klemmt. Hier ist das Lego-Set durch die leichte Bauweise im Vorteil.

Die größten Kritikpunkte sind aber die Rollen an sich. Der Aufbau des Phywe-Versuchs erweist sich als Herausforderung in Geschick und Feinmotorik der Schülerinnen und Schülern und endet nicht selten in benötigter Hilfestellung durch die Lehrkraft. Die Durchführung des Fadens durch die Rollen stellt sich oft als problembehaftet dar, da die Lücken für den Faden zu klein sind. Hat man dies endlich geschafft, rutscht der Faden immer wieder aus den Umlenkrollen. Vor allem in Kombination mit zwei festen und zwei losen Rollen ist es ein Geduldsspiel, bis man es meist abwechselnd geschafft hat, auf allen Rollen die Fäden zu halten. Dabei muss dauerhaft eine hohe Spannung auf dem Faden liegen. Hier schafft der Lego-Versuch durch die breiten und tiefen Rillen Abhilfe. Die Art der Aufhängung der Rollen bietet außerdem genug Platz, um den Faden problemlos hindurchzuziehen.

Messungen der Zugkraft mit zwei und vier tragenden Seilen mit Hilfe eines Federkraftmessers führten zu folgendem Ergebnis:

Tabelle 3:
Messergebnisse Flaschenzüge

n	1 Gewichtskraft)	2	4
Phywe	0,7N	0,36N	0,2N-0,3N
Lego	0,7N	0,37N	0,2N

Es ist zu erkennen, dass das Phywe- sowie das Lego-Experiment bei zwei tragenden Seilen Werte in der Nähe des rechnerischen Wertes (0,35N) liefern. Bei vier tragenden Seilen weicht das Lego-Experiment nur minimal vom rechnerischen Wert (0,175N) ab. Für das Experiment von Phywe ergibt sich eine größere Abweichung. Der Wertebereich war hier zwischen 0,2N und 0,3N angesiedelt. Dies lag unter anderem daran, dass die Laufräder oft blockierten und dann wieder liefen. Hat man während des Blockierens gemessen, so ließ sich ein höherer Wert ablesen als während der leichtgängigen Phase. Da man die Rollen von Phywe nicht zerstörungsfrei aus ihrer Halterung nehmen kann, konnte kein Grund hierfür festgestellt werden. Es ist anzumerken, dass hierbei ein neuer Experimentierkasten verwendet wurde.

3.2.5 Reflexion und Optimierung

Mit dem Versuch sind alle Ziele zu erreichen, die auch mit dem Versuch des Lehrmittelverlages zu erreichen sind. Die Kraft – Weg Korrelation sowie eine genaue Messung zur Herleitung der Formeln für den Flaschenzug sind gut umsetzbar. Im gegebenen Fall waren die hierfür benötigten Werte mit dem Versuch aus Lego sogar genauer. Ob dies generell der Fall ist oder ob es nur an dem vorhandenen Experimentierkasten lag, kann an dieser Stelle nicht festgestellt werden. Da die Werte des Lego-Experiments nichtsdestotrotz in einem für die Schule sinnvollen Rahmen lagen, ist hier der Vergleich nicht weiter erforderlich. Die beliebige Erweiterbarkeit stellt hier das Potential dar, einen sehr großen Flaschenzug bauen zu können, sei dies als Demoexperiment oder ebenfalls als Schülerexperiment.

Der Aufbau ist hierfür etwas komplexer und kann bei höheren Belastungen instabil werden. Es empfiehlt sich dann, eine stabilere Konstruktion zu schaffen, indem mehr Technic-Elemente miteinander verbunden werden.

Für Messungen sind ein Federkraftmesser und Gewichte zum Anhängen unabdingbar. Gemeinsam mit diesen zusätzlichen Elementen stellt der Versuch aus Lego eine nützliche, günstigere und gut brauchbare Alternative dar.

3.3 Experiment zum Wellrad

3.3.1 Physikalischer Hintergrund

Wellräder wurden, wie viele „einfache Maschinen“, durch ihre Einfachheit bereits in der Antike eingesetzt, um Lasten zu heben. Oft wurden sie als Winden, wie zum Beispiel in Brunnen oder in Kränen eingesetzt. Sie bestehen aus einer Welle und einem Wellrad. Diese sind starr miteinander verbunden und besitzen einen unterschiedlichen Radius, wobei das Wellrad den größeren Radius besitzt. Wellräder gab es in unterschiedlich großen Ausführungen, manche groß genug, um ein Nutztier im Wellrad laufen zu lassen. An der kleineren Welle wurde meist ein Seil befestigt, welches nach und nach auf und wieder abgewickelt wurde.

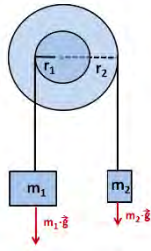


Abbildung 7:
Wellrad,
übernommen aus
Wellrad, von
Wikipedia, o. D.,
de.wikipedia.org/wiki/Wellrad/

Das Wellrad ist, wie auf **Abbildung 7** zu sehen, vereinfacht wie ein Hebel zu betrachten. Somit gilt Gleichung (1-4):

$$\vec{F}_1 \cdot \vec{r}_1 = \vec{F}_2 \cdot \vec{r}_2 \quad (3-1)$$

Da die Zug- sowie Lastkraft und deren Zusammenhang mit den Radien beim Wellrad im Mittelpunkt stehen ergibt sich

$$\vec{F}_Z \cdot \vec{R} = \vec{F}_l \cdot \vec{r} \quad (3-2)$$

als angepasste Formel. Hiermit wird der Zusammenhang zwischen der aufzubringenden Kraft am großen Rad mit dem Radius R sowie der Gewichtskraft der Last im Zusammenhang mit dem kleineren Rad mit dem Radius r verdeutlicht. Wird nun am größeren Rad gedreht, oder ein Seil über das größere Rad abgewickelt, ergibt sich für die aufzubringende Kraft:

$$\vec{F}_Z = \vec{F}_l \cdot \frac{\vec{r}}{\vec{R}} \quad (3-3)$$

3.3.2 Didaktische Überlegungen

Das Wellrad siedelt sich, wie der Hebel und der Flaschenzug, im gleichen Themengebiet in der Sekundarstufe 1 an. Auch bei dieser „einfachen Maschine“ in den Diensten des Menschen kann versucht werden, einen alltäglichen Zugang zu wählen. „Versucht“, da ein Wellrad ein Aufbau ist, den die meisten Schülerinnen und Schüler nicht unbedingt im Alltag als solchen schon erkannt haben. Hier bietet sich unter anderem ein geschichtlicher Einstieg an. Kransysteme oder auch Brunnen wurden oft über ein Wellrad angetrieben, in dem Tiere und Menschen laufen konnten. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Wellrad im Brunnenraum der Burg Ronneburg nahe bei Frankfurt, wie auf **Abbildung 8** zu sehen ist. Die Einfachheit des Wellrades spielte in der historischen



Abbildung 8:
Wellrad auf Burg Ronneburg
übernommen aus Burg
Ronneburg, von Wikipedia, o. D.,
de.wikipedia.org/wiki/Burg_Ronneburg/

Nutzung eine sehr starke Rolle, auf die in jedem Fall eingegangen werden sollte.

Heutzutage werden Wellräder unter anderem bei Seilbahnen, Winden und Baumaschinen verwendet. Viele Anwendungen des Wellrades sind nicht mehr so offensichtlich, wie bei den historischen Maschinen.

Das Wellrad als solches ist ein sehr einfaches Schülerexperiment, das mit wenigen Teilen ebenfalls sehr gut Drehmomente sowie den Begriff des Kraftsparens aufzeigen kann, was mit einem verlängerten Weg verbunden ist. Hierbei kann in erster Linie die reine Kraftersparnis betrachtet werden, indem man ein Gewicht durch Drehung am Wellrad hebt. Mit Hilfe eines Fadens, welcher um das große Wellrad gewickelt wird, kann dann auch die verlängerte Wegstrecke veranschaulicht werden.

Sprachlich kann am Anfang die Erkenntnis stehen, dass je größer der Kreis, desto mehr muss man kurbeln. Diese Aussage kann noch zur Goldenen Regel der Mechanik oder zu Gesetzmäßigkeiten verfeinert werden.

Es sollte am Anfang darauf geachtet werden, dass die Radien idealerweise Vielfache voneinander sind, damit einfache Bezüge zwischen Kraftmessung und Radius hergestellt werden können. Hierfür werden Federkraftmesser und Gewichte benötigt. Die Messungen sollten immer statisch erfolgen. Der Vorteil des Wellrads bei Kraftmessungen ist, dass es nur eine Achse gibt, die minimale Reibung erzeugt und die zu bewegende Masse sich durch den Faden, an dem sie hängt, nur minimal verändert, was in der Schule zu vernachlässigen ist.

Die Schülerinnen und Schüler sollen bei diesem Experiment eine sehr alte Erfindung kennenlernen, die sich die Hebelwirkung zu Nutze macht, was auf den ersten Blick nicht unbedingt selbsterklärend scheint. Hinzu kommen die Erkenntnisse über das mechanische Kraftsparen, das mit einem größeren Weg verbunden ist. Es können Vergleiche mit anderen „einfachen Maschinen“ aufgestellt werden, die alle einen unterschiedlichen Aufbau haben, jedoch dasselbe physikalische Prinzip innehaben.

3.3.3 Integration von Lego

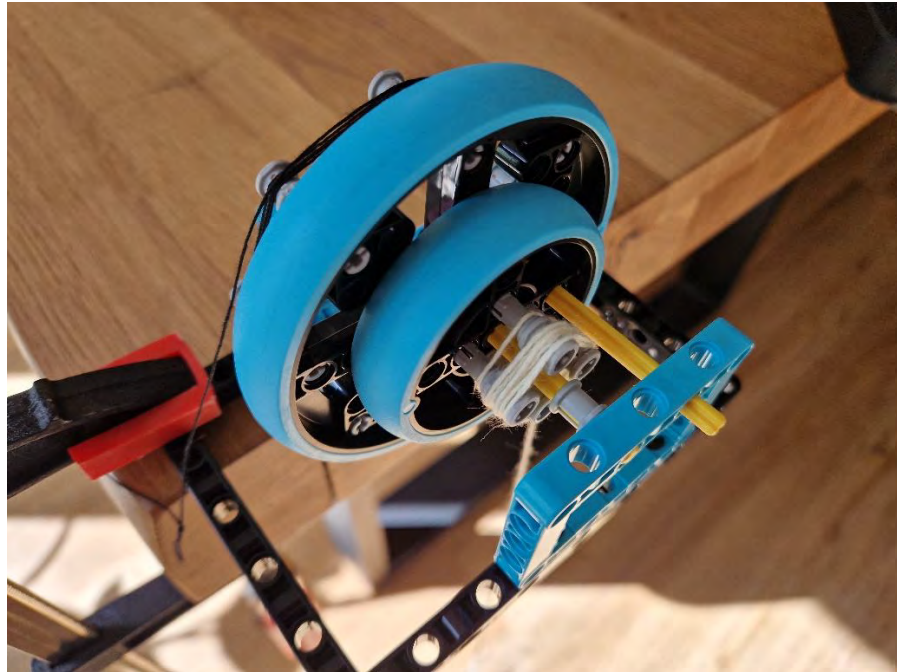


Abbildung 9:
Wellrad aus Lego,
eigenes Foto

Tabelle 4:
Teileliste Wellrad,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
23948		Technic, Axle 11L	1
2780	6279875	Technic, Pin with Short Friction Ridges	4
32054	6321747	Technic, Pin 3L with Friction Ridges and Stop Bush	12
3713	6275844	Technic Bush	2
39367pb01		Wheel 56 x 14 Technic with Axle Hole	1
39790	6295161	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 11 x 15	1
49295pb01		Wheel 88 x 14 Technic with Axle Hole	1
64179		Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 5 x 7	2

Bei einem Wellradexperiment ist es wichtig, dass man genügend Freiraum nach unten hat, sodass die Last gehoben werden kann. In der Umsetzung mit Lego kann man dies erzielen, indem man den Aufbau an einer Tischkante befestigt oder zwischen zwei Tischen eine kleine Lücke lässt, durch die der Faden, an dem die Last hängt, geführt wird. Eine Arretierung muss hier trotzdem stattfinden, damit der Versuchsaufbau nicht über den Tisch gezogen wird, wenn man am großen Rad den Faden abwickeln möchte. Der große, untere Rahmen bietet für beides genügend Stabilität. Bei höheren Lasten können hier auch zwei Rahmen mit Pins verbunden werden, sodass ein mögliches Biegen verhindert wird.

Dadurch, dass die angegebenen Räder in der Mitte kein klassisches Loch für Pins, sondern eines für eine Achse haben, reicht eine durchgehende lange Achse aus, um die Räder zu verbinden und gleichzeitig aufzuhängen. Ein weiterer Vorteil der gewählten Räder ist, dass sie verschiedene Radien bieten, in denen die großen Pins befestigt werden, auf denen die Fäden aufgerollt werden können. Insbesondere beim großen Rad sind nicht nur Löcher für Pins in 90°-Schritten angeordnet, sondern auch dazwischen. Durch die vorgegebenen Pin-Abstände können so auch leicht Vielfache der Radien erzeugt werden, um diese mit den entsprechenden Kraftmessungen zu vergleichen.

Für die Seilführung werden Pins verwendet, da hier mittels einer einfachen Schlaufe das Seil zu befestigen ist und eine höhere Flexibilität, ohne Auseinanderbauen, für die Radien erzeugt wird, im Gegensatz zu Laufrädern, auf deren Äußeren das Seil verläuft.

Auf **Abbildung 9** ist eine weitere Achse zu sehen, die eingeschoben ist. Dies dient zur Arretierung während des Experimentaufbaus. Man kann so das Gewicht anhängen und den Federkraftmesser befestigen, ohne dass sich das Wellrad bewegt und der Faden abgerollt wird. Nach dieser Vorbereitung kann man die Technic-Achse wieder herausziehen. Diese ist nur durch Pin-Löcher hindurch gesteckt.

Auch hier ist wichtig, dass die Achse frei drehbar ist und nicht durch einen Bush (ein kleines Bauteil auf der Achse) daran gehindert wird.

Als zusätzliche Materialien sind auch hier ein Faden, ein Federkraftmesser, eine Klemme und Gewichte vorgesehen.

Perspektivisch ist es durch die gummierte Oberfläche der Räder möglich einen Motor über Reibungskupplung mit Hilfe eines weiteren Rades anzubringen. Alternativ können auch Zahnräder verwendet werden, wodurch mit diesem Versuch Energieumwandlungsprozesse gut veranschaulicht werden können.

3.3.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten

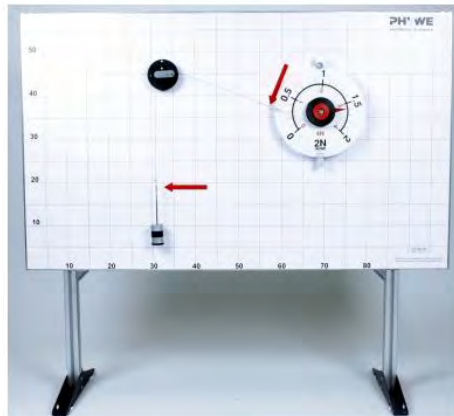


Abbildung 10:
Wellrad Phywe,
übernommen aus *Wellrad*, von PHYWE
Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
www.phywe.de/versuche-sets/versuche-fuer-sekundarstufe-i/wellrad_9412_10343/



Abbildung 11:
Wellrad Leybold,
übernommen aus *VP1.2.3.2 Wellrad*, von Leybold
Didactic GmbH, o. D., www.leybold-shop.de/vp1-2-3-2.html

Für das Lego-Wellrad ist mit Kosten von 6,81 € zu rechnen. Hierbei hat sich kein günstigerer Preis bei Gebrauchtteilen ergeben, was insbesondere an den Rädern liegt, die verwendet werden. Diese machen ungefähr die Hälfte des Preises aus und sind meist nur in ungebrauchtem Zustand zu erhalten.

Wenn man bei Lehrmittelherstellern nach Wellrädern sucht, so ist die Auswahl nicht sehr groß. Bei Phywe (**Abbildung 10**) gibt es ein Demo-Experiment (Art.-Nr. P1254100), das 987,46 € kostet. Von Leybold (**Abbildung 11**) kann der Versuch (Art.-Nr. P1.2.3.2) auch als Schülerexperiment verwendet werden, kostet trotz allem noch 859,54 €, wobei die Wellradscheibe (Art.-Nr. 342 75) mit 580,72 € ins Gewicht fällt. Ohne direkte Kaufmöglichkeit wird ein weiterer Wellradversuch (Art.-Nr. LP1.2.4.5) auf der Website von Leybold angezeigt. Dies liegt daran, dass er Teil eines Experimentierkastens (Art.-Nr. LP1.2.B) ist, der 1.525,10 € kostet. Für diesen Versuch kann man die Einzelteile jedoch auch getrennt bestellen. Zwei Rollen, die miteinander verbunden werden können, würden zusammen nur 27,73 € kosten. Hinzu kommen noch Ständer und Verbinder.

Was bei allen Versuchen auffällt, ist, dass keine flexiblen Einstellmöglichkeiten der Radien vorhanden sind. Diese sind durch den äußeren Radius der Räder

gegeben. Hier bietet der Lego-Versuch mehr Möglichkeiten, wodurch die Schülerinnen und Schüler spielend die Physik hinter dem Versuch entdecken können. Hinzu kommt die größere Ähnlichkeit des Aufbaus mit Lego zu historischen Vorbildern, die meist nicht nur einseitig aufgehängt waren. Dies sorgt insbesondere bei einem geschichtlich motivierten Zugang zu einer besseren Vergleichbarkeit zwischen Experiment und Vorbild.

Von Vorteil bei den Lehrmittelversuchen ist, dass man keine Tischkante benötigt, an der der Versuch festgeklemmt wird. Bei Phywe dient die Tafel als Arretierung und bei Leybold bieten die Ständer mit Fuß einen festen Stand.

Was aus den Versuchsbeschreibungen nicht hervorgeht und auch auf den Bildern nicht zu erkennen ist, sind Arretierungen, um ein verfrühtes Abwickeln des Gewichts zu verhindern. Hierbei entstehen, wie beim Flaschenzug, mögliche Frustrationsmomente und das Aufwickeln des Fadens wird zum Geduldsspiel.

Leider können keine Messungen miteinander verglichen werden, da kein Zugang zu den Experimenten von Phywe und Leybold bestand. Der Lego-Versuch hat nur minimale Abweichung von den rechnerischen Werten geliefert. Für 0,6N Last bei einem Verhältnis der Radien von 4 zu 1 wurden auf dem Zug-Federkraftmesser 0,16N abgelesen.

3.3.5 Reflexion und Optimierung

Der Versuch bietet im Verhältnis eine sehr günstige Alternative zu fertig kaufbaren Versuchen. Gleichzeitig wird eine höhere Flexibilität geboten, die zu einem spannenderen Experimentieren führen kann. Dies, gepaart mit der hohen Genauigkeit von Messergebnissen, macht den Versuch zu einem gelungenen Entwurf und einem lohnenden Schülerexperiment.

Beim Aufwickeln der Fäden hat sich ein bestimmtes Vorgehen als sinnvoll erwiesen, bei dem man den Faden mit der Last an einem Pin hängen lässt und dann diesen durch Drehen der Räder unter Last aufwickelt. Nun arretiert man das Wellrad und fädelt die Schlaufe des Zugseils um einen Pin am Wellrad. Die Arretierung kann nun gelöst werden und das Zugseil wird durch Herablassen des

Gewichts automatisch aufgewickelt werden. Die einfache Arretierung hat sich bei diesem Versuch als sehr nützlich erwiesen.

Der Aufbau, der vom Stil nahe an alte Originale herankommt, hat durch die Pin-Löcher an den Rädern leider einen Nachteil. Insbesondere am kleinen Rad wirkt die Aufwicklung der Lastschnur nicht rund, sondern eher quadratisch. Dies kann den Schülerinnen und Schülern schnell auffallen und zu Verwirrung führen. Hier kann man durch Anwendung der Geometrie eine tatsächlich vorhandene Abweichung ausrechnen und erklären, was dies für Auswirkungen in unseren schulischen Messbereichen verursacht.

Durch die in **Abschnitt 4.3.3** erwähnte Erweiterbarkeit mittels eines Motors kann dieser Versuch perspektivisch auch im Themenbereich Energie eingebracht werden.

Für höhere Lasten kann ein ähnlicher Aufbau verwendet und auch größere Wellräder eingebaut werden. Es lohnt sich das Experiment auf zwei Tischen mit einer Lücke aufzubauen, damit ein Durchhängen vermieden wird.

3.4 Tellurium – Sonne, Erde, Mond

3.4.1 Physikalischer Hintergrund

Der Himmel fasziniert wohl seit jeher die Menschen. Die Babylonier benutzten Tabellen um „[...] alle am Himmel zu beobachtenden Erscheinungen zu beschreiben, wie zum Beispiel den Auf- und Untergang von Sonne und Mond, die Mondphasen sowie die Bewegung der Planeten und Fixsterne“ (Simonyi, 2004, S. 81). Den Griechen ist eine „perfekte Beschreibung der am Himmel zu Beobachtenden Bewegungen mit Hilfe von geometrischen Modellen“ gelungen. (Simonyi, 2004, S. 81)

Die Astronomie beschäftigt sich mit solchen Himmelskörpern und hat sich seit der Zeit der Babylonier und Alten Griechen stark weiterentwickelt. Die Zusammenhänge zwischen Sonne, Erde und Mond sind hierbei komplexer als auf den ersten Blick zu erkennen. Im Folgenden wird sich deshalb nur mit den

nötigen Hintergründen für ein Tellurium beschäftigt, um den Rahmen dieser Arbeit nicht sprengen.

Viele Himmelskörper rotieren um ihre eigene Achse, so auch die Sonne, die Erde und der Mond. Die Sonne rotiert um ihre eigene Achse, wobei hier die Pole langsamer rotieren als der Äquator, da sie ein Gasball ist. Je nach Messmethode und Ort auf der Sonne wird von 25-30 Tagen für eine Rotation um die eigene Achse ausgegangen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, o.D.). Die Erde benötigt hierfür nur 24 Stunden, sprich einen Tag. Der Tag-Nacht-Rhythmus hängt somit unmittelbar mit der Erdrotation zusammen. Der Mond dreht sich auch um seine eigene Achse. Hierfür benötigt er 27,3 Tage (ARD alpha, 2022).

Die 27,3 Tage, die der Mond um seine eigene Achse rotiert, ist genau die Zeit, die der Mond zum Umkreisen der Erde benötigt. Aus diesem Grund sieht man auf der Erde auch immer dieselbe Seite des Mondes. Dieses Umkreisen ist jedoch eher ein gemeinsames Kreisen von Sonne und Mond um ein Baryzentrum, wie in der Astronomie ein gemeinsamer Schwerpunkt von Himmelskörpern genannt wird. Die geschieht durch Gravitation und die Trägheit des Mondes. Das Gravitationsgesetz wurde von Newton wie folgt formuliert:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (4-1)$$

Diese Kraft muss gleich der Zentripetalkraft für den Mond F_Z sein:

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (4-2)$$

Durch die Bewegung von Mond und Sonne sind die Gezeiten zu erklären, für die die Gravitation des Mondes hauptverantwortlich ist, wobei die Sonne auch einen Teil hierzu beiträgt, was insbesondere in Springfluten zu sehen ist, bei denen die Gravitation von Sonne und Mond gemeinsam wirken. Gleichzeitig stabilisiert der Mond die Erdrotation und verlangsamt diese minimal.

Die Mondphasen, die unseren Kalender bestimmen, kommen auch durch diese Rotation um die Erde und Sonne zustande. Die Sonne beleuchtet den Mond. Je nachdem wie der Mond zur Erde und Sonne steht, sehen wir mehr oder weniger der beleuchteten Mondoberfläche. Der „fehlende“ Teil liegt im auf sich selbst geworfenen Schatten des Mondes.

Das Paket aus Mond und Erde rotiert gemeinsam um die Sonne. Hierfür braucht die Erde circa 365,25 Tage, also somit ein Jahr. Aufgrund der circa 0,25 zusätzlichen Tage entstehen Schaltjahre. Gleichzeitig entstehen durch die Rotation um die Sonne die Jahreszeiten, da unsere Erdachse um circa 23,5 Grad geneigt ist. Hierdurch werden Nord- und Südhemisphäre teils unterschiedlich lang dem Sonnenlicht ausgesetzt.

Wenn man nun noch den Strahlengang des Sonnenlichts betrachtet, kann man Mond- und Sonnenfinsternisse erklären. Eine Mondfinsternis entsteht dann, wenn der Mond sich in den Kernschatten der Erde bewegt. Eine Sonnenfinsternis entsteht, indem der Mond die Sonne verdeckt. Der Mond schiebt sich hierbei zwischen Sonne und Erde. Diese Konstellation ist abhängig vom Beobachtungsort und tritt als totale Sonnenfinsternis in Deutschland erst wieder im Jahr 2081 auf (Sonnenfinsternis.org, o.D.).

3.4.2 Didaktische Überlegungen

Wie unschwer zu beobachten ist, haben die Bewegungen von Sonne, Erde und Mond direkte Auswirkungen auf unseren Alltag. Dies und die Faszination, die das Weltall ausübt, sind gute Voraussetzungen für eine intrinsische Motivation von Schülerinnen und Schülern. So hat passenderweise die Firma Lego eine Studie in Auftrag gegeben, die sich mit diesem Interesse beschäftigte. Sie lieferte das Ergebnis, dass unter 3000 befragten Kindern aus den USA, dem Vereinigten Königreich und China 86% ein hohes Interesse am Weltall zeigen. 11% gaben an, dass sie später einmal Astronaut werden möchten (The Harris Poll, 2019).

Das Thema der Astronomischen Phänomene, das im Kerncurriculum Sekundarstufe 1 in das Thema „Erweiterung der Sinne“ eingegliedert ist (Hessisches Kultusministerium, 2024), sollte somit praktisch ein Selbstläufer sein, gäbe es hier nicht einige Herausforderungen, die es zu lösen gilt.

Eines hiervon sind die astronomisch großen Abstände. Wenn wir ein Maßstabsmodell benutzen wollen würden, bei dem der Mond einen Abstand von 5cm von der Erde hat, hätten Sonne und Erde immer noch einen Abstand von 19,46 Metern. Dies ist für ein Experiment im Unterricht nicht realisierbar, es lohnt sich aber diese Abstände auf dem Schulhof durchzuspielen. Somit müssen

Kompromisse eingegangen werden und vor allem die Kernelemente der Abstände und gemeinsamen Bewegungen verdeutlicht werden: Der Mond ist näher an der Erde und dreht sich gemeinsam mit der Erde um die Sonne.

Eine weitere große Thematik sind die Drehbewegungen. Der Mond muss sich passend um die Erde drehen, damit immer die gleiche Seite zur Erde zeigt und das gemeinsame Drehen mit Erdrotation um die Sonne muss auch stimmig sein, da sonst die Schülerinnen und Schüler nicht alle gewünschten Zusammenhänge erkennen können. Diese sind vor allem der Mond-, Tages-, Monats- und Jahresrhythmus. Hinzu kommen noch die Mond- und Sonnenfinsternis. Ein Baryzentrum ist hierfür nicht notwendig, weswegen dieses bei einem Modellversuch außer Acht gelassen werden kann. Die restlichen Drehbewegungen müssen gut aufeinander abgestimmt sein, damit es keine Unstimmigkeiten gibt, die innerhalb eines simulierten Jahres auffallen.

Sprachlich sollten astronomische Fachbegriffe erst nach und nach eingeführt werden. Statt zum Beispiel Rotation, Revolution, Inklination, Ekliptik können Begriffe wie Drehen, Umkreisen, Schräglage, Umlaufbahn verwendet werden.

Wie schon erwähnt, werden die Abstände nicht maßstabsgerecht aufgezeigt und Zeiten beschleunigt. Dies hat zur Folge, dass man eher qualitative Ansprüche an das Experiment stellen kann.

Die Schülerinnen und Schüler sollen anhand des Experimentes ein Verständnis der Erdrotation und des damit einhergehenden Tag- und Nacht-Rhythmus erlangen sowie die Achsneigung und den Erdumlauf als Auslöser für die Jahreszeiten verstehen. Hinzu kommt der Mondumlauf mit Mondphasen, die Erkenntnisse über die unterschiedlichen Arten von Finsternissen und die hintere Seite des Mondes, die wir nie sehen. Bei einem guten Tellurium können auch die Monate abgelesen werden.

3.4.3 Integration von Lego



Abbildung 12:

Tellurium von Lego,

übernommen aus *Sonne Erde Mond Modell 42179*, von LEGO GmbH, o. D., www.lego.com/de-de/product/planet-earth-and-moon-in-orbit-42179

Das Tellurium ist ein Lego-Set, das unter dem Namen „Sonne Erde Mond Modell“ läuft und die Artikelnummer 42179 hat. Es besteht aus 526 Teilen und gehört zur Lego Technic-Reihe. Von einem Versuch eine Eigenkreation von einem Tellurium zu entwickeln, kann abgeraten werden, da die Bautechniken, die zu so einem Modell gehören, sehr fortgeschritten sind und einige Sonderteile enthalten sind, die auf dem Zweitmarkt ein selbst entwickeltes Tellurium nicht besser oder günstiger machen.

Das Modell besteht aus einer stabilen Unterkonstruktion, die durch die verwendeten Reifen auch auf glatten Oberflächen nicht verrutscht. Hier ist eine Kurbel angebracht, die auch durch einen Motor ersetzt werden kann. In der großen Unterkonstruktion sind bereits ein Getriebe und ein Ring mit Monatsangaben integriert.

Darauf befindet sich eine weitere Konstruktion mit Übersetzungen und der Sonne, die als gelbe Kugel dargestellt wird. Der Ausleger, der zu Erde und Mond führt, ist stabil mit der sich drehenden Konstruktion verbunden.

Am Ende des Auslegers ist noch einmal ein komplexes Getriebe angebracht, das eine schräg stehende Erde zum Drehen bringt und die Rotation des Mondes um die Erde bewirkt. Die Erde ist durch eine blaue Kugel mit Bedruckung dargestellt. Diese Kugel ist kleiner als die Sonne, aber größer als der Mond, der als eine kleinere graue Kugel dargestellt wird.

Der Bau ist für ein Modell mit insgesamt 526 Teilen sehr komplex und bietet an vielen Stellen Momente, bei denen man die Finesse der Designer bewundert.

3.4.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten

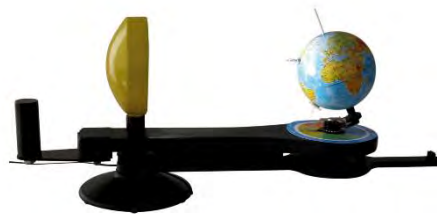


Abbildung 13:
Tellurium Phywe,
übernommen aus *Tellurium, beleuchtet*, von
PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
www.phywe.de/physik/licht-und-optik/lichtausbreitung/tellurium-beleuchtet_17501_19504/



Abbildung 14:
Tellurium Cornelsen,
übernommen aus 31115 *Tellurium N*, von
Cornelsen Experimenta, o. D., www.cornelsen-experimenta.de/shop/de/Grundschule/Sachunterricht/Geographie/31115-Tellurium+N.html

Tellurien, bei denen sich die Erde und der Mond passend bewegen gibt es von Phywe (Art.-Nr. 04864-93) (**Abbildung 13**) für 561,68 € und von Cornelsen (Art.-Nr. 31115) (**Abbildung 14**) für 736,05 €. Beide Modelle lassen sich über einen Hebel drehen, wobei sich die Erde in eine Rotation begibt und der Mond dabei um die Erde kreist. Beide Modelle haben im Zentrum eine Lampe, die auf die Erde leuchtet. Hiermit können Mondphasen, Tag-Nacht-Rhythmus und Sonnen- sowie Mondfinsternisse gezeigt werden. Diese eingebaute Funktion hat das Lego-Modell nicht. Dafür drehen sich die Modelle der Sonne nicht unabhängig vom Ausleger, was beim Tellurium von Lego der Fall ist. Das Lego-Tellurium ist für eine unverbindliche Preisempfehlung von 79,99 € bei Lego

erhältlich. Bei anderen Anbietern erhält man das Modell regelmäßig für unter 50 €.

Die Techniken, mit denen die Drehungen ermöglicht werden, sind bei Cornelsen nicht zu erkennen. Bei Phywe wird dies mit O-Ringen ermöglicht, die mit Planetengetrieben verbunden sind. Hiervon sieht man nur die O-Ringe. Bei Lego sieht man hier durch den nicht verschlossenen Aufbau jedes Zahnrad und kann deren Zusammengreifen von allen Blickwinkeln aus beobachten.

Zu den Laufzeiten kann bei Phywe keine Aussage getroffen werden, da ein solches Tellurium beim Erstellen dieser Hausarbeit nicht zur Hand war. Das Modell von Cornelsen hat, einem YouTube Video nach zu urteilen, eine langsamere Drehgeschwindigkeit der Erde vorzuweisen (Cornelsen Verlag, 2014, 0:57).

Für die Rotationszeiten des Telluriums von Lego ergeben sich anhand der vielen verschiedenen Zahnradübersetzungen sehr realistische Werte. Die Erde umläuft die Sonne in 364,5 Tagen, was einer Abweichung um 0,75 Tage von der Realität entspricht. Hierbei rotiert die schräg stehende Erdachse, was die verschiedenen Jahreszeiten simuliert. Der Mond dreht sich innerhalb von 27 Tagen um die Lego-Erde, was eine Differenz von 0,3 Tagen zum realen Wert ergibt. Zu guter Letzt dreht sich die Sonne in 27 Tagen um sich selbst, was ungefähr im Mittel der unterschiedlich stark rotierenden Teile der Sonne liegt. Der Schrägstand der Erdachse beträgt $22,5^\circ$, also ein Grad Abweichung zur Realität.

Alle Modelle bieten Monatsangaben, die man ablesen kann. Das Lego-Modell bietet hierbei noch zusätzlich ablesbare Mondphasen.

3.4.5 Reflexion und Optimierung

Das Tellurium von Lego ist für seinen Preis eine sehr komplexe mechanische Apparatur und keineswegs ein reines Spiel-Set.

Die Rotations- und Umlaufzeiten haben eine Genauigkeit, mit der man sehr gut im Unterricht arbeiten kann, da diese nur minimale Abweichungen zur Realität aufzeigen. Durch das Kurbeln am Modell kann ein ganzes Jahr realistisch simuliert werden, wodurch bei den Schülerinnen und Schülern keine

Fehlvorstellungen durch eine zu langsame Erdrotation entstehen. Es ist wie bereits erwähnt erstaunlich, was die Designer hier geleistet haben. Die vielleicht bewusste Entscheidung, den Mechanismus offen zu lassen, um an jeder Stelle des Aufbaus diesen arbeiten sehen zu können, ist exzellent. Sie schafft noch mehr Faszination, ohne vom eigentlichen Unterrichtsinhalt abzulenken. Eine mögliche Erweiterung um einen Motor, der statt der Kurbel angeschlossen wird, sorgt dafür, dass man ein Jahr im Zeitraffer erleben kann.

Da die Monate und Mondphasen nur durch Aufkleber angezeigt werden, könnten sich diese im schulischen Betrieb lösen und verlorengehen. Hier muss man im Nachhinein auf den Lego-Teilen neue Beschriftungen anbringen.

Die fehlende Lampe im Lego-Modell sorgt dafür, dass man ohne Stromanschluss und ohne leicht zerstörbare Teile den Versuch durchführen kann und realistische Bewegungen der Himmelskörper simuliert. Gleichzeitig fehlt die Möglichkeit, Mondphasen und Finsternisse mithilfe eines integrierten Lichts zu simulieren. Abhilfe schafft hier eine Taschenlampe mit Fresnel Linse. Um diese zu verwenden, kann man die Sonne ganz einfach von einer Achse abziehen und hat Platz, um mit der Taschenlampe die Erde und den Mond zu beleuchten. Hiermit können Mondphasen, Jahreszeiten, Sonnen- und Mondfinsternis veranschaulicht werden.

Mit der Erweiterung um eine Taschenlampe mit Fresnel-Linse werden alle Ziele des Versuchs erreicht und er stellt eine passende Alternative zu den bekannten Versuchen dar. Die Möglichkeit, mehrere Tellurien zu erwerben und somit den Schülerinnen und Schülern ein Experimentieren in Gruppen zu ermöglichen, schafft wertvolle Möglichkeiten die Zusammenhänge zwischen Sonne, Erde und Mond kennenzulernen.

3.5 Experiment zur Kreisbewegung

3.5.1 Physikalischer Hintergrund

Für den Versuch der Kreisbewegung wird von einer gleichförmigen Kreisbewegung ausgegangen. Hierbei bewegt sich ein Körper auf einer

Kreisbahn mit einem festen Radius r um ein Drehzentrum Z . Man spricht von einer gleichförmigen Kreisbewegung, wenn der Körper in gleichen Zeitabständen eine gleiche Strecke auf der Kreisbahn zurücklegt (LEIFIphysik, o.D.-a).

Kreisbewegungen sind unter anderem durch ihre Umlaufdauer T definiert. Diese Zeitgröße gibt an, wie lange ein Körper für eine volle Umdrehung benötigt. T hängt unmittelbar mit der Frequenz f zusammen, für die gilt:

$$f = \frac{1}{T} \quad (5-1)$$

Statt einer geraden Strecke existiert bei der Kreisbewegung die Bahnstrecke s . Zusammen mit dem Drehwinkel ϕ ergibt sich:

$$s = \phi \cdot r \quad (5-2)$$

Wenn man nun nach der Geschwindigkeit fragt, können zwei Antworten gegeben werden. Zum einen gibt es die Bahngeschwindigkeit, die im klassischen Sinne als Geschwindigkeit des Objektes auf der Bahn interpretiert werden kann, und die Winkelgeschwindigkeit, die beschreibt, welcher Drehwinkel in einer gewissen Zeit überschritten wurde. Hierfür wird im Bogenmaß gerechnet: $360^\circ = 2\pi$. Mit (5-1), (5-2) und

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (5-3)$$

ergibt sich für die Bahngeschwindigkeit:

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T} = 2\pi \cdot r \cdot f \quad (5-4)$$

Es ergibt sich für den Winkel und einer dazugehörigen Zeit:

$$\omega = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (5-5)$$

Analog zu (5-4) folgt:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f \quad (5-6)$$

Die Geschwindigkeit ist eine vektorielle Größe und keine skalare. Sie ist definiert durch Betrag und Richtung. Auf der Kreisbahn verändert sich die Richtung ständig, da der Geschwindigkeitsvektor tangential am Kreis liegt.

„Wenn eine Geschwindigkeit also nicht ihren Betrag, sondern nur ihre Richtung verändert, so ist dennoch eine Beschleunigung im Spiel – und genau dies ist bei der gleichförmigen Kreisbewegung der Fall.“ (Halliday et al, 2009, S. 85). Diese sogenannte Zentripetalbeschleunigung ist senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor in Richtung Z gerichtet und gegeben durch:

$$a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r \quad (5-7)$$

Die Herleitung hierzu folgt nach (5-9).

„Eine Wechselwirkung, die eine Beschleunigung eines Körpers hervorrufen kann, wird eine Kraft genannt.“ (Halliday et al, 2009, S. 102). Somit muss bei der Kreisbewegung durch das Vorhandensein der Zentripetalbeschleunigung auch eine Kraft wirken. Diese Zentripetalkraft ist mit (2-2) und (5-7):

$$F_Z = m \cdot a = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (5-8)$$

„Eine Bewegung, die sich in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt, bezeichnet man als periodische Bewegung.“ (Halliday et al, 2009, S. 449). Die gleichförmige Kreisbewegung ist somit eine periodische Bewegung und kann durch ein Koordinatensystem, zusammen mit dem Ursprung Z, in ihre x- und y-Komponenten zerlegt werden. Diese Komponenten folgen den Gesetzen einer harmonischen Schwingung. Für die Komponenten der Bewegung gilt allgemein:

$$y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5-9)$$

Als Herleitung zu (5-7) wird diese allgemeingültige Form der harmonischen Schwingung benötigt sowie die Phasenverschiebung der x- und y-Bewegung um $\frac{1}{2}\pi$. Für die Bewegung in x-Richtung ergibt sich:

$$\vec{x} = \vec{r} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5-10)$$

$$\ddot{\vec{x}} = \overrightarrow{a_x} = -r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5-11)$$

Analog ergibt sich für y:

$$\vec{y} = \vec{r} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (5-12)$$

$$\ddot{\vec{y}} = \overrightarrow{a_y} = -r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (5-13)$$

Somit ergibt sich für den Betrag von a , der aus x- und y-Komponente besteht:

$$\begin{aligned} |\vec{a}| &= \sqrt{(-r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 + (-r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t))^2} \\ &= r \cdot \omega^2 \cdot \sqrt{\sin^2(\omega \cdot t) + \cos^2(\omega \cdot t)} = r \cdot \omega^2 \cdot 1 = r \cdot \omega^2 \end{aligned} \quad (5-14)$$

3.5.2 Didaktische Überlegungen

Im hessischen Kerncurriculum der Oberstufe ist für die E-Phase in E.3 das Thema „Kreisbewegung“ vorgesehen. Hier soll die Zentripetalkraft als Ursache der Kreisbewegung erläutert werden. In Q2.1 werden Schwingungen behandelt und dazugehörige Schwingungsgleichungen wie in (5-9) aufgestellt (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024). Insbesondere im Leistungskurs werden hier Differentialgleichungen und Phasenverschiebungen thematisiert.

Als Herleitung zu einem Kreisbahnversuch kann nach Kircher (2015) ein Spiel dienen, bei dem ein funkgesteuertes Auto, das nur geradeaus fährt, auf einer gezeichneten Kreisbahn gehalten werden soll. Hierbei müssen die Schülerinnen und Schüler das Auto regelmäßig zum Kreismittelpunkt schubsen. Es wird dazu eine Kraft aufgebracht. Es werden im Verlauf noch weitere Radialkräfte besprochen, die beispielsweise einen Satelliten in der Umlaufbahn halten können. Dies führt spielerisch zu einem Experiment, das die Zusammenhänge von Größen auf einer Kreisbahn erklärt (Kircher, 2015, S. 398).

Das Experiment soll ermöglichen einen direkten Zusammenhang zwischen der Umlaufdauer, dem Radius und der Bahngeschwindigkeit zu ziehen. Hierbei bietet sich eine Videoanalyse - zum Beispiel mit VianaNet - an, da hier eine einfache Zerlegung der x- und y- Komponenten der Bewegung möglich ist und diese grafisch dargestellt werden können. Hierdurch sollen im Idealfall erkennbare Sinusfunktionen für die Auslenkungen und dazugehörigen Geschwindigkeiten geplottet werden. Diese Darstellung kann dann genutzt werden, um zu (5-9) überzugehen.

Für das direkte Sichtbarmachen der Kraft gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es können Federkraftmesser verwendet werden oder auch das Handy. Hierbei

hilft eine App, die die wirkenden Beschleunigungen mittels eines Pfeils darstellen kann. Es ist essenziell zu verstehen, dass die Zentripetalkraft nach innen wirkt. Mögliche Beschleunigungsmessungen durch das Handy können auch entsprechende Ergebnisse am PC liefern.

Sprachlich - auch in der Oberstufe - sollte nicht von vornherein mit Fachbegriffen wie Zentripetalkraft oder Winkelgeschwindigkeit gearbeitet werden. Bevor diese genau definiert werden, kann man von einer nach innen ziehenden Kraft sprechen sowie der Geschwindigkeit der Drehung. Im Laufe der Aufarbeitung des Beobachtbaren werden nach und nach die Begriffe, die in **Abschnitt 4.5.1** genannt wurden, passend zur Jahrgangsstufe, eingeführt.

3.5.3 Integration von Lego

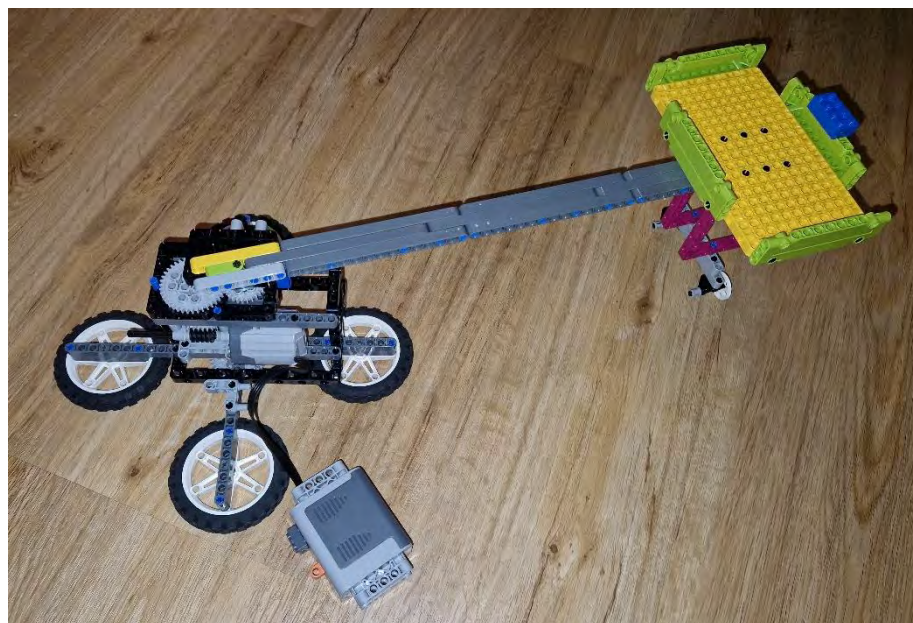


Abbildung 15:
Kreisbahn aus Lego,
eigenes Foto

Tabelle 5:
Teileliste Rotationsversuch,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
14720	ElementId	Technic, Liftarm, Modified H-Shape Thick 3 x 5	2
15458	6250232	Technic, Panel Plate 3 x 11 x 1	4
18651		Technic, Axle 2L with Pin with Friction Ridges	4
2780	6279875	Technic, Pin with Short Friction Ridges	66
2903c01		Wheel 61.6mm D. x 13.6mm Motorcycle	4
2905	4211653	Technic, Liftarm, Modified Triangle Thin 3 x 5	2
32069	6278276	Technic, Steering Arm with Pins	2

32073	4114740	Technic, Axle 5L	2
32278	4542576	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	9
32278	4542577	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	7
32316	4211651	Technic, Liftarm Thick 1 x 5	1
32523	4509376	Technic, Liftarm Thick 1 x 3	2
32524	4495930	Technic, Liftarm Thick 1 x 7	6
32525	4611705	Technic, Liftarm Thick 1 x 11	1
32526	4211713	Technic, Liftarm, Modified Bent Thick L-Shape	2
32905	6199162	Technic, Gear Worm Screw, Long, Axle	1
3648	4211565	Technic, Gear 24 Tooth with 1 Axle Hole	2
3649	6195314	Technic, Gear 40 Tooth	3
3705	370526	Technic, Axle 4L	2
3706	370626	Technic, Axle 6L	1
3713	6275844	Technic Bush	3
39369	6252630	Technic, Panel Plate 11 x 19 x 1	1
39790	6295161	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 11 x 15	1
39794		Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 7 x 11	2
40490	6102449	Technic, Liftarm Thick 1 x 9	1
4185	6330136	Technic Wedge Belt Wheel (Pulley)	3
42003	6273728	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular	1
4265a		Technic Bush 1/2 Toothed with 4 Interior Ridges	7
4274	4211483	Technic, Pin 1/2 without Friction Ridges	4
44294	4268663	Technic, Axle 7L	1
55615	6313453	Technic, Pin Connector Perpendicular 3 x 3	2
59510c01		Electric 9V Battery Box 4 x 11 x 7	1
58121c01		Electric, Motor 9V Power Functions XL	1
60484	6402262	Technic, Liftarm, Modified T-Shape Thick 3 x 3	1
60485		Technic, Axle 9L	1
64179	6016154	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 5 x 7	5
6536	6261375	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular	2
6558	6299413	Technic, Pin 3L with Friction Ridges	38

Das Experiment stellt hohe Anforderungen an Stabilität und Kraftübertragung. Der stabile Stand wird hier durch vier große Reifen sichergestellt, die ein Verrutschen über Reibungskräfte verhindern. Die Anordnung der Reifen verhindert gleichzeitig ein Kippen des Experiments. Zum Antrieb sei gesagt, dass das Batteriepack, zum Ärger vieler Lego-Enthusiasten, nicht mehr hergestellt wird. Selbstverständlich sind diese Motoren gebraucht zu erhalten. Bei diesem Experiment wurde aber ein Produkt von Aliexpress verbaut, was somit kein Original-Lego ist, aber - wie eingangs erwähnt - eine Alternative sein kann. In der Teileliste ist jedoch der Originalmotor aufgeführt. Der Motor benötigt genug Drehmoment und Befestigungsmöglichkeiten, weswegen ein XL-Motor verwendet wurde. An diesem befinden sich einige Pin-Konnektoren, um eine stabile Integration zu ermöglichen. Zur Position des Antriebes gibt es zwei Alternativen. Man kann den Antrieb nach außen setzen, wodurch man im Prinzip ein Fahrzeug hat, das sich selbst antreibt und durch die Konstruktion auf einer Bahnkurve gehalten wird. Hierbei gibt es Schwierigkeiten mit dem rotierenden Gewicht, was für Instabilität durch Unwucht sorgt. Hinzu kommt, dass man so bei verschiedenen Radien keine konstante Winkelgeschwindigkeit

erzielt, dafür eine konstante Bahngeschwindigkeit. Die Wahl fällt in diesem Experiment auf einen im Rotationszentrum liegenden Motor. Dieser sorgt für eine bessere Stabilität sowie eine konstante Winkelgeschwindigkeit, wenngleich die Mechanik hierdurch komplexer wird.

Diese Komplexität zeigt sich im Getriebe. Es muss ein Schneckengetriebe mit folgender Übersetzung eingebaut werden, da ansonsten die Rotation nicht flüssig läuft oder Zahnräder zerstört werden. Letzteres zeigt zwar eindrucksvoll, was für Kräfte wirken, ist aber leider nicht zielführend, um ein dauerhaft funktionierendes Experiment zu ermöglichen. Mittels der Zahnräder kann nach Belieben die Übersetzung verändert werden, um verschiedene Winkelgeschwindigkeiten zu erlangen.

Der Ausleger ist so konzipiert, dass man ihn stark verkürzen und verlängern kann. Ein Segment verlängert diesen um 12cm und besteht aus acht Teilen. An ihm befestigt, befindet sich ein Laufwagen mit Handyhalterung. Hier können gängige Handys hereingelegt werden. Falls nötig kann dieser vergrößert werden. Bei diesem Experiment wurde ein Laufwagen verwendet, da dieser das Problem des Kippens bei großen Radien löst und durch die Konstruktion mit zwei leichtgängigen Rädern kaum Reibung verursacht. Auf dem äußeren Ende des Auslegers ist ein Lego-Stein befestigt, der im Idealfall eine Farbe hat, die sonst nicht im Modell vorkommt. Dieser kann zur Videoanalyse verwendet werden.

3.5.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten



Abbildung 16:
Zentralkraft Conatex,
übernommen aus *Zentralkraft-Gerät Versuch*, von Conatex GmbH, o. D.,
www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/zentralkraft-geraet-versuch.html

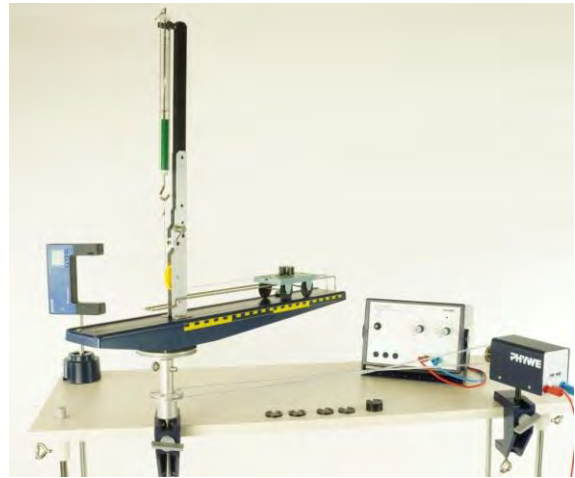


Abbildung 17:
Zentrifugalkraft Phywe,
übernommen aus *Zentrifugalkraft mit Cobra SMARTsense*, von PHYWE Systeme GmbH & Co. KG,
o. D., www.phywe.de/physik/mechanik/kreisbewegung-rotation/zentrifugalkraft-mit-cobra-smartsense_26197_28203/

Der vorgestellte Versuch kostet mit Antriebseinheit aus gebrauchten Teilen 70,62 € und mit Neuteilen 145,24 €. Die teuersten Teile sind hierbei der Motor und das Batteriefach, für die es preiswertere Alternativen zu Lego gibt. Der günstigste Lehrmittelversuch (**Abbildung 16**) stammt von Conatex (Art.-Nr. 1192066) und kostet 199,92 €. Hierbei fehlt der Motor (Art.-Nr. 1192065), welcher ohne Netzteil 442,68 € kostet. Darauf folgt ein Versuch von NTL (Art.-Nr. P9902-4Z), der 616,71 € kostet. Phywe stellt zwei Versuche her. Der erste (Art.-Nr. P2131602) (**Abbildung 17**) kostet 2.278,14 € und misst die Zentripetalkraft (wenn auch hier Zentrifugalkraft genannt) mit einem Federkraftmesser, wie bei beiden vorherigen Versuchen. Der zweite Versuch (Art.-Nr. P6000667) kostet 2.889,08 €, wobei hier die Kraft digital gemessen wird. Leybold schafft es, diesen Versuch (Art.-Nr. P1.4.3.3) mit digitalen Messmöglichkeiten für „nur“ 5.401,53 € anzubieten. Das Problem bei all diesen Versuchen ist, dass mit einem sich nach außen bewegendem Wagen gearbeitet wird, der für Schülerinnen und Schüler mitsamt des Federkraftmessers den Eindruck erweckt, als ob die bestimmende Kraft nach außen ziehe. Diese Vorstellung begründet sich in der Messung der Gewichtskraft mit einem Federkraftmesser. Die Auslenkung erfolgt dabei in Kraftrichtung.

Eine Möglichkeit zum Verlängern des Auslegers oder zum Befestigen eines Handys konnte nicht entdeckt werden. Beides ist sinnvoll, wenn man, wie beim Lego-Experiment, sich einen Beschleunigungspfeil mit dem Handy anzeigen lässt. Dieser wackelt auf dem Handy mit der App Physics Toolbox enorm, zeigt aber stets tendenziell nach innen und zittert meist um die Senkrechte zur Bewegungsrichtung, wie man den Ausschnitten des Bildschirmschnappschusses (Abbildung 18) entnehmen kann.



Abbildung 18:
Screenshots zur Zentripetalbeschleunigung,
eigene Screenshots aus der App Physics Toolbox

Bei der Videoanalyse mit dem Lego-Versuch konnte folgendes Ergebnis zu den Weg-Zeit Diagrammen erstellt werden (Abbildung 19 und 20).

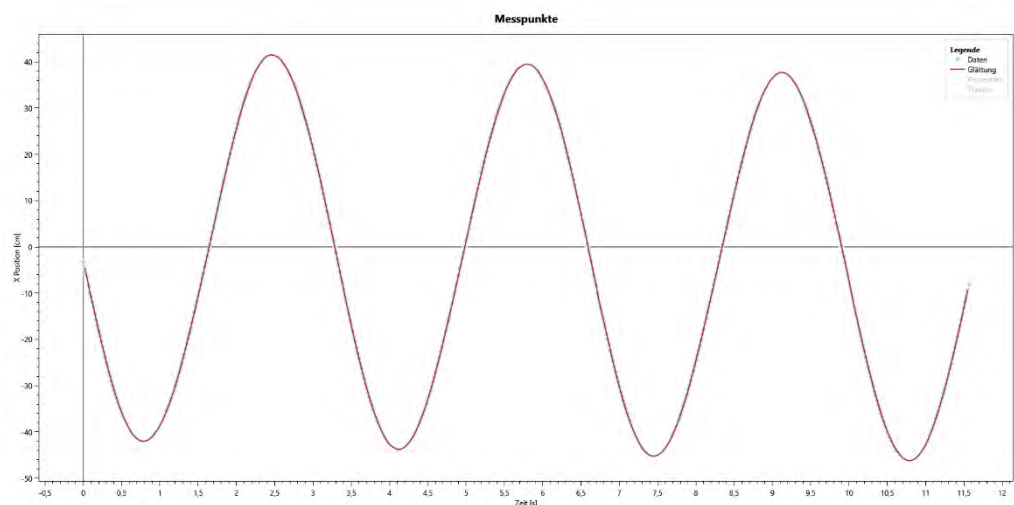


Abbildung 19:
 x -Weg-Zeit-Diagramm,
Darstellung erzeugt mit Viana.NET

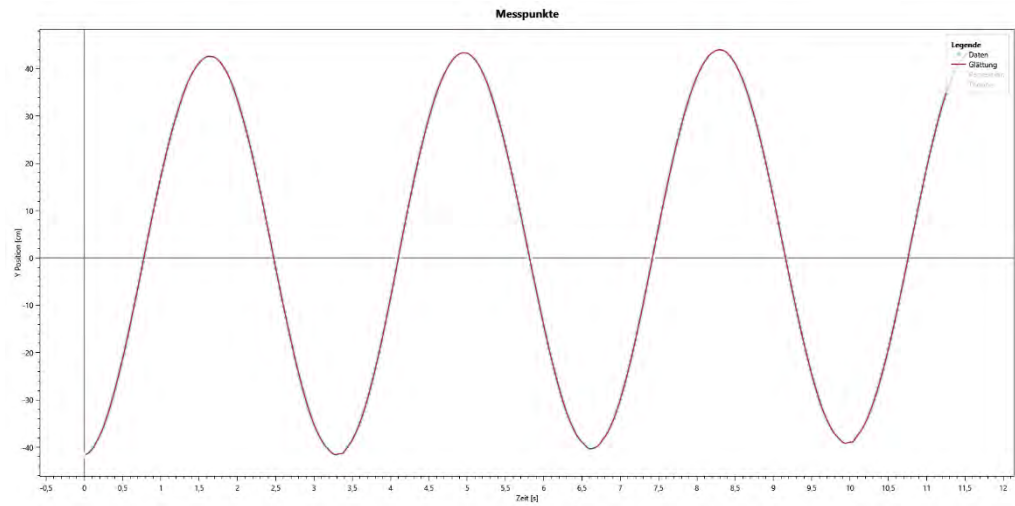


Abbildung 20:
y-Weg-Zeit-Diagramm,
 Darstellung erzeugt mit Viana.NET

Für die Geschwindigkeit und Beschleunigung in *y*-Richtung die dazugehörigen
 Diagramme (**Abbildung 21 und 22**):

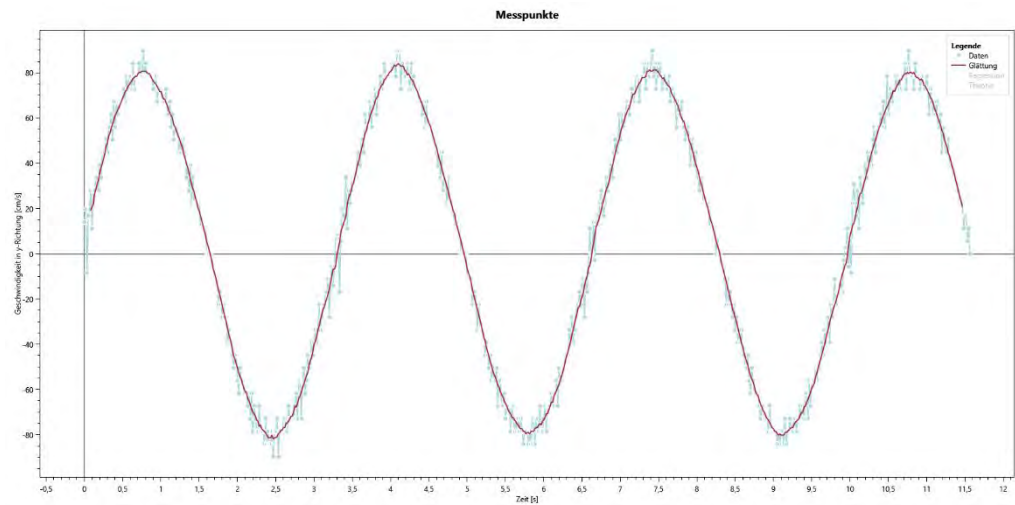


Abbildung 21:
y-Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm,
 Darstellung erzeugt mit Viana.NET

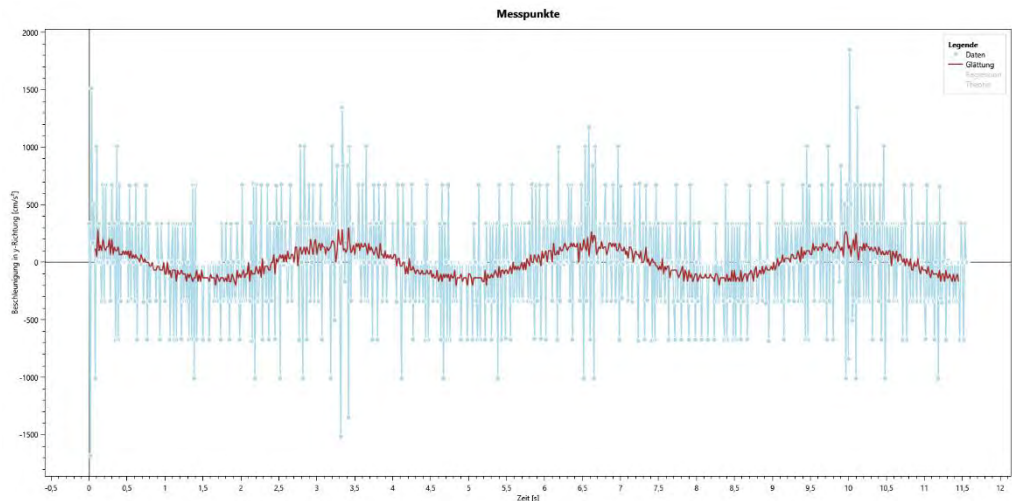


Abbildung 22:
y-Beschleunigung-Zeit-Diagramm,
 Darstellung erzeugt mit Viana.NET

3.5.5 Reflexion und Optimierung

Den Zusammenhang zwischen Radius und Bahngeschwindigkeit bei konstanter Winkelgeschwindigkeit kann man durch die leichte Erweiterbarkeit hervorragend mit den Schülerinnen und Schülern bearbeiten. Hierzu bietet es sich an ein großes Papier unterzulegen, um die verschiedenen Radien aufzuzeichnen und später mit Hilfe eines Seiles abzumessen. Die Beschleunigung, die durch das Handy nach innen angezeigt wird, ist für das in der Durchführung verwendete Handy nicht sehr stabil, sondern zittert stark. Hier könnte ein anderes Mobiltelefon Abhilfe schaffen oder man könnte einen zuverlässigeren Beschleunigungssensor am Ausleger befestigen, der einem bessere Ergebnisse als das Handy liefert. Zur direkten Sichtbarkeit einer Kraftwirkung bleibt auch hier die Möglichkeit der Installation eines Federkraftmessers, mit der Beachtung einer möglichen Fehlvorstellung über die Krafrichtung.

Zur Videoauswertung dieses Versuches ist zu sagen, dass er leicht mit Hilfe von VianaNET auszuwerten ist. Es wurden stets bei Reflexion auf dem bunten Stein manuelle Korrekturen durchgeführt. Die Sinuskurven sind deutlich abzulesen, auch die Phasenverschiebung der x- und y- Diagramme sowie die dazugehörigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgraphen. Somit ist dies ein guter Versuch, um die Elemente der Gleichung zu harmonischen Schwingungen zu

erkennen. Perspektivisch kann hiermit auch ein möglicher Ableitungszusammenhang zwischen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung kenntlich gemacht werden. Die gestreuten Werte für die Beschleunigung liegen an der mehrfachen Verrechnung der Zeit-Weg-Werte. Hierbei werden Ungenauigkeiten bei der Messung, zum Beispiel durch unruhiges Halten des Handys bei Videoaufnahmen, oder durch falsche Punktsetzung in der Videoanalyse verstärkt. Nichtsdestotrotz sind die Charakteristika der Schwingung gut abzulesen.

Eine manchmal verwendete Alternative zu diesen Versuchsaufbauten ist eine Salatschleuder mit einer Sensorapp. Bei dieser kann man, je nach Aufbau der Schleuder, keinen Vektorpfeil auf dem Handy beobachten oder keine gute Videoanalyse durchführen. Für reine Messwerte, die vom Handy aufgezeichnet werden, ist dies auch ein kostengünstiger Versuchsaufbau.

Dieser Versuch ist in der Konzeption der Versuch mit dem höchsten Aufwand und hatte einige Zahnräder als Tribut gefordert. Das Ergebnis lässt sich dafür sehen, insbesondere in der Videoanalyse.

3.6 Experiment zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung

3.6.1 Theoretischer Hintergrund

„Bei vielen Arten von Bewegungen ist die Beschleunigung entweder konstant oder zumindest annähernd gleichmäßig.“ (Halliday, 2009, S. 24) Dieser Umstand wird in der Schule genutzt, um die Beschleunigung und damit einhergehende Gesetzmäßigkeiten zu behandeln. Durch eine gleichmäßige Beschleunigung können leicht Zusammenhänge zwischen Weg, Zeit, Geschwindigkeit und Beschleunigung analysiert werden. Im Folgenden ist eine mathematische Herleitung zu den Gesetzmäßigkeiten formuliert.

Eine Beschleunigung ist eine Änderung der Geschwindigkeit nach der Zeit. Somit gilt:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (6-1)$$

Daraus folgt:

$$d\vec{v} = \vec{a} dt \quad (6-2)$$

Durch das unbestimmte Integral erhält man:

$$\vec{v} = \int d\vec{v} = \int \vec{a} dt = \vec{a} \int dt = \vec{a} \cdot t + C = \vec{a} \cdot t + \vec{v}_0 \quad (6-3)$$

Wobei hier die Konstante C mit $\vec{v}_0$ ersetzt werden kann, welche die Anfangsgeschwindigkeit der Bewegung ergibt.

Die Geschwindigkeit ist die Änderung der Strecke nach der Zeit. Es gilt:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (6-4)$$

Hieraus folgt:

$$d\vec{s} = \vec{v} dt \quad (6-5)$$

Durch unbestimmte Integration folgt:

$$\begin{aligned} \vec{s} &= \int d\vec{s} = \int \vec{v} dt = \int (\vec{a} \cdot t + \vec{v}_0) dt = \frac{1}{2} \vec{a} \cdot t^2 + \vec{v}_0 \cdot t + C' \\ &= \frac{1}{2} \vec{a} \cdot t^2 + \vec{v}_0 \cdot t + \vec{s}_0 \end{aligned} \quad (6-6)$$

C' ist in diesem Fall eine mögliche Strecke, die schon überschritten wurde zum Zeitpunkt $t = 0$. Für diesen Versuch wird die Beschleunigung durch die Gewichtskraft eines Gewichtes nach (2-2) verursacht.

3.6.2 Didaktische Überlegungen

Gleichmäßig beschleunigte Bewegungen gliedern sich im Hessischen Kerncurriculum (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024) in das Thema E.1 „Bewegungen und ihre Beschreibungen“ in der E-Phase ein. Hierbei werden generell Bewegungen untersucht und in t-s-, t-v- und t-a-Diagrammen dargestellt. Für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen wird explizit die Definition der Beschleunigung das Zeit-Weg- sowie das Zeit-Geschwindigkeits-Gesetz bearbeitet. Hierzu gehört die Herleitung, beziehungsweise eine grafische Ermittlung. (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024)

Beschleunigungen erfahren die Schülerinnen und Schüler täglich. Erfahrungen sind hier beispielsweise Beschleunigungen mit alltäglichen Verkehrsmitteln. Diese müssen nicht immer gleichmäßig sein. Für ein „immer schneller werden“ kann das bergab Rollen mit dem Fahrrad als Beispiel verwendet werden. Hierbei wird man immer schneller, bis der Luftwiderstand und andere Reibungskräfte zu groß werden. Dies kann als Einstieg thematisiert werden. Statt Beschleunigung kann man hier ein „immer schneller werden“ verwenden, beziehungsweise eine ständige Erhöhung der Geschwindigkeit.

Bei diesem Versuch soll es vor allem um die angesprochene grafische Auswertung gehen mit Hinführung zu den entsprechenden Formeln, unter Vernachlässigung der Reibung. Dies wird mittels Videoanalyse durchgeführt. Hinzu kommen Verständnisse zu den wirkenden Kräften, insbesondere der Gewichtskraft. Diese ist den Schülerinnen und Schülern aus der Mittelstufe bekannt, wodurch die Beschleunigung mittels Argumentation über die Gravitationskonstante als linear betrachtet werden kann.

Zuerst sollte die Einführung der linearen Beziehung $\vec{v} = \vec{a} \cdot t$ erfolgen, da diese leichter zugänglich ist als die Weg-Zeit-Formel (6-6). Die Beschleunigung wird hierbei bestenfalls als Änderung der Geschwindigkeit verstanden werden.

Ein mögliches Ausrechnen von g durch Kraftgleichsetzen kann ebenfalls vorgenommen werden. Hierbei werden die Zusammenhänge von Kraft, Masse und Beschleunigung wiederholt thematisiert.

3.6.3 Integration von Lego

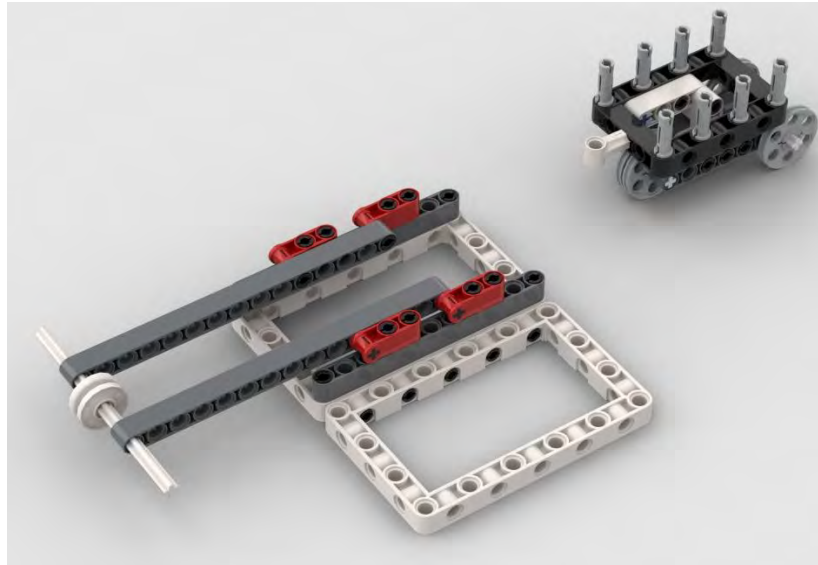


Abbildung 23:
Umlenkrolle und Rollwagen aus Lego,
eigenes Rendering erzeugt mit Studio 2.0

Tabelle 6:
Teileliste gleichmäßig beschleunigte Bewegung,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
2780	6279875	Technic, Pin with Short Friction Ridges	20
32013	6332573	Technic, Axle and Pin Connector Angled #1	1
32073	4166139	Technic, Axle 5L	1
32140	6271824	Technic, Liftarm, Modified Bent Thick L-Shape 2 x 4	1
32278	4542576	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	2
32524	4495931	Technic, Liftarm Thick 1 x 7	2
32525	4603472	Technic, Liftarm Thick 1 x 11	2
3737		Technic, Axle 10L	1
39794	6247435	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 7 x 11	2
4185	6321743	Technic Wedge Belt Wheel (Pulley)	4
42003	6273712	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular	4
43093	4309323	Technic, Axle 1L with Pin with Friction Ridges	6
4519	4124021	Technic, Axle 3L	1
56902		Wheel 18mm D. x 8mm	1
60484	6402262	Technic, Liftarm, Modified T-Shape Thick 3 x 3	1
64179	6016154	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 5 x 7	1
6558		Technic, Pin 3L with Friction Ridges	8
6558	655826	Technic, Pin 3L with Friction Ridges	3

Der Wagen, der als Dreirad konzipiert ist, rollt auf glatten Rädern, da diese eine sehr kleine, glatte Auflagefläche haben, die für wenig Reibung sorgt. Die Seiten dieser Räder sind ebenfalls glatt, was ein mögliches seitliches Reiben an anderen Elementen weniger problematisch macht. Der Wagen ist so kompakt wie möglich gebaut. Das Fahrzeug ist so konzipiert, dass auf ihm gängige Gewichte positioniert werden können. Die Pins dienen hier als Stützen, die die Gewichte

vor dem Herunterrutschen bewahren. An der Vorderseite ist eine Halterung für ein Seil, welches mit einem Gewicht verbunden wird. Dieses Gewicht wird zusätzlich benötigt, wobei sich hier die gängigen Hängewichte von Lehrmittelherstellern anbieten. Das Seil wird über eine Umlenkrolle geführt, die frei auf einer Achse beweglich gelagert ist. Dies sorgt bei einem möglichen leichten Schrägstand der Bewegungsrichtung des Wagens zur Rollenachse für eine möglichst reibungsfreie Regulierung. Die Unterkonstruktion des Auslegers mit Rolle wird an der Tischkante festgeklemmt, damit die Masse, die den Wagen beschleunigt, frei nach unten hängen kann.

Es ist wichtig für die Videoanalyse noch zusätzlich einen Maßstab zu integrieren. Dies kann ein einfaches Lineal sein. Hinzu kommt für die automatische Videoanalyse ein bunter Lego-Stein, der auf dem Wagen positioniert wird und sich farblich von dem Rest des Wagens abhebt und eine Waage, um die Masse des Wagens mit Gewicht und der ziehenden Last zu bestimmen.

3.6.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten



Abbildung 24:
Rollbahn Phywe,
 übernommen aus *Zweites Newtonsches Gesetz /*
Rollenfahrbahn mit measure Dynamics, von PHYWE
 Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
[www.phywe.de/versuche-](http://www.phywe.de/versuche-sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/)
[sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-](http://www.phywe.de/versuche-sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/)
[rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/](http://www.phywe.de/versuche-sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/)



Abbildung 25:
Rollbahn Conatex,
 übernommen aus *Rollenfahrbahn*
Komplettsset 1,4 m, von Conatex GmbH,
 o. D., [www.conatex.com/physik-](http://www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html)
[lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-](http://www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html)
[dynamik/rollenfahrbahn-](http://www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html)
[komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-](http://www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html)
[1-4-m.html](http://www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html)

Der Versuch kostet gebraucht 4,82 € und mit Neuteilen 14,82 €. Ein vergleichbares Experiment existiert von Phywe (Art.-Nr. P2130380) und Conatex (Art.-Nr. 1162030). Das Experiment von Phywe (**Abbildung 24**) ist auf die Videoanalyse mit Measure Dynamics ausgelegt, weshalb im Paket von Phywe auch eine Lizenz beiliegt. Das Experiment kostet 1523,98 € und

beinhaltet alles, was man für das Experiment benötigt. Gewichte, Waage, Software und Faden dabei. Der Versuch von Conatex (**Abbildung 25**) ist nicht direkt auf eine Videoanalyse ausgelegt, jedoch liegen hier zwei Halter für Lichtschranken für eine Zeitmessung bei. Diese Lichtschranken (Art.-Nr. 1162043) kosten zusätzlich 259,42 € extra. Die Grundausrüstung von Conatex kostet als solche 473,62 €. Hier fehlt die Waage, die bei Phywe mitgeliefert wird. Es gibt noch einige andere Versuche von Lehrmittelherstellern, die man für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung verwenden kann. Diese funktionieren meist nur mit den herstellerinternen Sensorsystemen und sind zumeist um einiges teurer, weswegen sich auf direkt vergleichbare Experimente beschränkt wurde.

Durch die Videoanalyse mittels VianaNet haben sich gute Ergebnisse erzielen lassen, wie auf **Abbildung 26** und **Abbildung 27** zu erkennen ist.

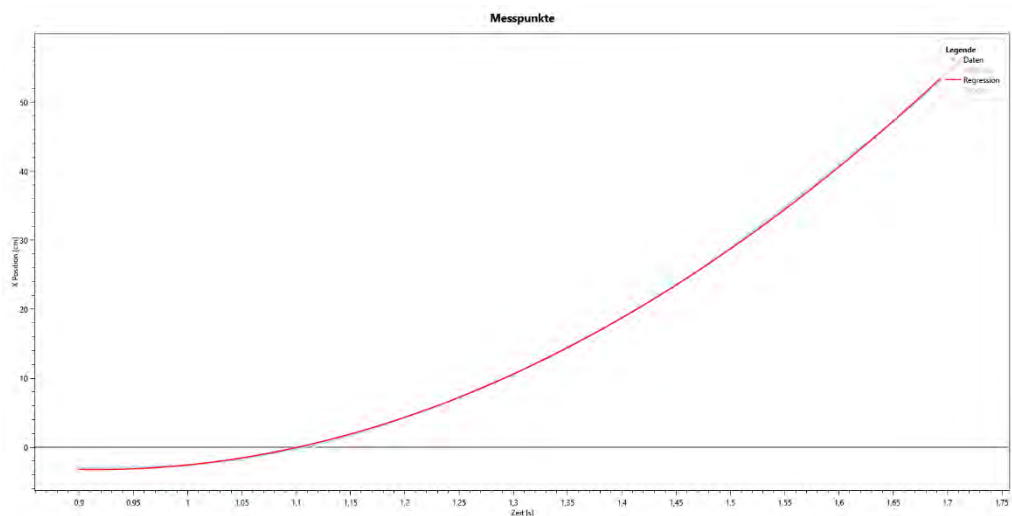


Abbildung 26:
Weg-Zeit-Diagramm gleichmäßig beschleunigte Bewegung,
 Darstellung erzeugt mit Viana.NET

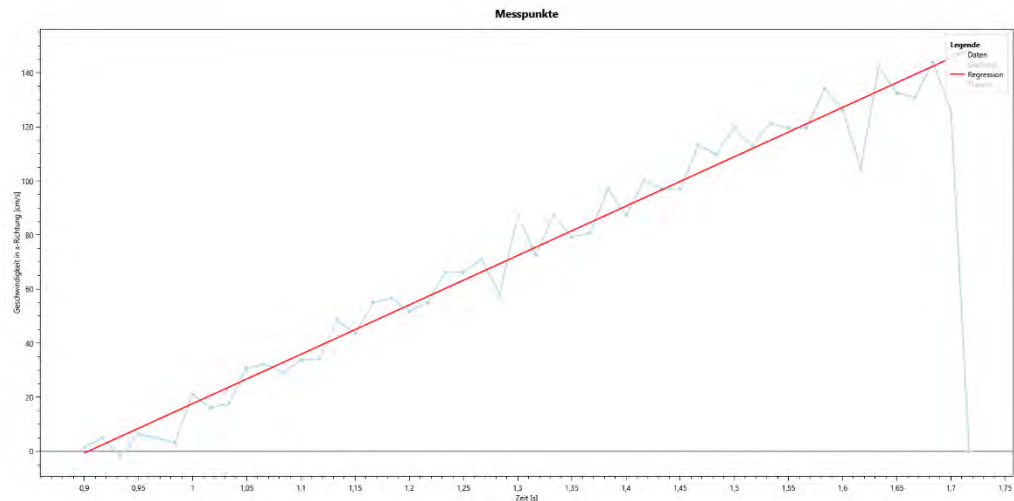


Abbildung 27:
Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm gleichmäßig beschleunigte Bewegung,
 Darstellung erzeugt mit Viana.NET

Die Messung lieferte für die Zeit-Weg-Beziehung eine Parabel und für die Zeit-Geschwindigkeits-Beziehung eine Gerade. Gut zu erkennen sind die quadratischen und linearen Zusammenhänge.

Für die Bestimmung von g über das Gleichsetzen von wirkenden Kräften ergaben Messwerte, die aus zwei Videos abgeleitet wurden, $8,56 \frac{m}{s^2}$ und $8,12 \frac{m}{s^2}$. Für die Bestimmung dieser Werte wurde das Video zusätzlich in einem Videoschnittprogramm über die Framerate ausgewertet. Der Phywe Versuch hat nach seiner Anleitung (PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, o. D.-a) einen Wert von $8,7 \frac{m}{s^2}$ als Ergebnis, was den Ergebnissen des Lego-Versuchs ähnlich ist.

3.6.5 Reflexion und Optimierung

Der Versuch eignet sich mittels Videoanalyse die linearen und quadratischen Zusammenhänge von Zeit, Strecke und Geschwindigkeit bei einer gleichmäßig beschleunigten Bewegung darzustellen. Hierfür ist keine teure Rollbahn notwendig, wenn auch das Loslassen und Ausrichten des Rollwagens etwas umständlich ist. Die Umlenkrolle arbeitet genauso, wie sie soll und hat bei den Versuchsdurchführungen kein einziges Mal gehakt oder das Seil abspringen lassen.

Der Versuch hat beim Bestimmen von g eine ausgeprägte Schwäche. Hier zeigt sich, dass ein Auswerten durch ein Video, das mit dem Handy aufgenommen wurde, seine Grenzen hat. Es können Werte erzielt werden, die unter g liegen, was mit der Reibung erklärbar ist, jedoch ist die Auswertung hierfür sehr zeitintensiv. Hier erhält man mit Freihand-Fallversuchen und mehreren gemittelten Zeitmessungen bessere Ergebnisse. Wenn man einen Versuch, wie den vorgestellten, mit großer Genauigkeit durchführen möchte, lohnt sich vermutlich die Anschaffung einer Bahn mit integrierten Sensoren oder mehreren Lichtschranken. Ideal ist in diesem Fall eine Luftkissenbahn, wenn die finanziellen Mittel hierzu ausreichen, da hiermit Reibungswiderstände auf der Oberfläche eliminiert werden und das Ergebnis näher an g liegen kann.

Falls eine Waage sowie Gewichte und Faden vorhanden sind, ist der Versuch mit Lego, wenn er mit einer kostenlosen oder schon vorhandenen Videosoftware ausgewertet wird, eine sehr kostengünstige Alternative, um die genannten Zusammenhänge grafisch darzustellen.

3.7 Experimente zu Energieumwandlungsprozessen

3.7.1 Physikalischer Hintergrund

Die Definition von Energie ist als solche nicht sehr griffig sprachlich auszuformulieren. „[...] Energie, eine Größe, die in vielen verschiedenen Formen auftritt. In der Tat ist der Begriff der Energie so weit gefasst, dass eine einfache Definition nur schwer zu geben ist.“ (Halliday, 2009, S. 166) Eine viel verwendete Beschreibung liefert das Lexikon der Physik: „Energie, im klassischen Sinn Arbeitsvermögen physikalischer Systeme.“ (Spektrum der Wissenschaft, o.D.)

Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass wenn man Arbeit an einem System verrichtet, dies einer Erhöhung des Energieniveaus entspricht. Hierbei wird Kraft aufgebracht. Der Zusammenhang ist aus (2-4) schon bekannt. Es gilt:

$$\Delta E = W \quad (7-1)$$

Wichtige Eigenschaften von Energie sind, dass sie übertragbar und umwandelbar ist. Man kann also von einem System auf ein anderes System Energie übertragen, wobei die Form, in der die Energie vorhanden ist, geändert werden kann. Bekannte Formen der Energie sind die kinetische Energie:

$$W = F \cdot s = m \cdot a \cdot \frac{v^2}{2a} = \frac{1}{2}mv^2 = E_{kin} \quad (7-2)$$

Potenzielle Energie:

$$W = F_g \cdot h = mgh = E_{pot} \quad (7-3)$$

Spannenergie:

$$W = \int_0^s F(s')dx = \int_0^s D \cdot s' ds' = \frac{1}{2}Ds^2 = E_{spann} \quad (7-4)$$

Elektrische Energie im Gleichstromkreis:

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t = E_{el} \quad (7-5)$$

Es gibt noch viele weitere Energieformen, die nicht unbedingt alle über den Arbeitsbegriff hergeleitet werden können. Hierzu zählen unter anderem die Chemische Energie und die Kernenergie. Die Umwandlung einer Energieform in eine andere muss hierbei nicht immer direkt sein. Oft sind hierfür noch Umwandlungen in andere Zwischenenergieformen notwendig. Diese Energieumwandlungsprozesse, beispielsweise in einem mechanischen System ohne Reibung, laufen immer ohne Verlust von Energie ab. Dies ist das Prinzip des Energieerhaltungssatzes. Dieser besagt, dass die Gesamtenergie in abgeschlossenen Systemen immer konstant bleibt.

In der Realität ist aber zu beobachten, dass ein in Schwingung gebrachtes Fadenpendel nicht der Formel:

$$E_{pot} + E_{kin} = \text{konstant} \quad (7-6)$$

folgt. Man kann nach einiger Zeit anhand der geringer werdenden Auslenkung erkennen, dass die Gesamtenergie geringer wird. Diesen Vorgang nennt man Energieentwertung und er geschieht in mechanischen Prozessen oft durch Reibung.

$$W_{reib} = F_R \cdot s = \mu \cdot F_N \cdot s \quad (7-7)$$

Hierbei entsteht Wärmeenergie, die nicht mehr für das System verwendbar ist, aber an die Umgebung abgegeben wird. Das Verhältnis aus theoretisch vorhandener oder hinzugeführter Energie und nutzbarer Energie nennt man bei Energieumwandlungen Wirkungsgrad. Es gilt:

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{nutz}}}{\Delta E_{\text{zu}}} \quad (7-8)$$

3.7.2 Didaktische Überlegungen

Energietransport, Energiestrom und Entwertung werden in der Sekundarstufe 1 mit dem Thema „Energie in Umwelt und Technik“ behandelt (Hessisches Kultusministerium, 2024). In der Oberstufe gliedert sich das Thema in E.2 ein (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024), wobei hier explizit die Energieerhaltung genannt wird. In der Realität ist dies oft eine Wiederholung, da in der Mittelstufe Energieerhaltung sowie verschiedene Energieformen mit entsprechender Berechnung als Thema meist durchgeführt werden. Nach dem Hessischen Kultusministerium ist die Energie „[...] eine der wichtigsten Größen der Physik. Dieses Basiskonzept umfasst sowohl die physikalische wie auch die gesellschaftliche Relevanz der Energie.“ (Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen, 2024, S. 18) Insbesondere in Folge des Klimawandels und dem Krieg in der Ukraine ist eine Diskussion über Energiepolitik in aller Munde. Es wird deutlich, dass ein umfängliches Verständnis von Energie nicht nur gewünscht, sondern auch gesellschaftlich notwendig ist.

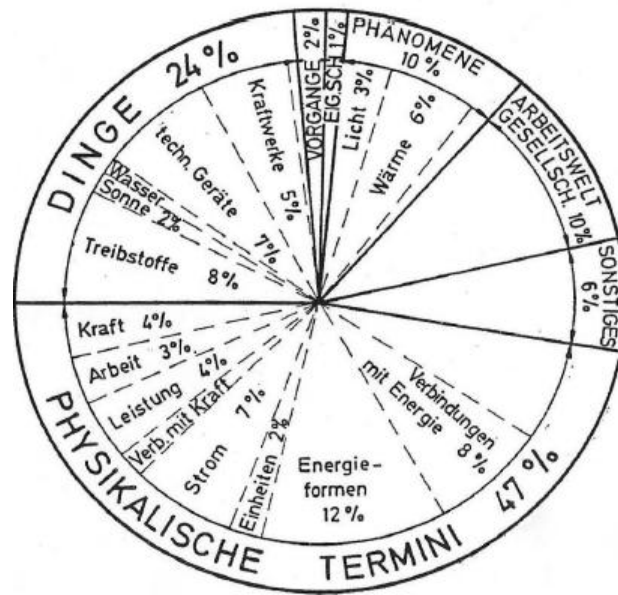


Abbildung 28:
Begriffe, die mit Energie assoziiert werden,
übernommen aus Duit (1986, S. 240)

Duit (1986) führte Untersuchungen mit 171 Schülerinnen und Schülern in Kiel durch und stellte die Frage, was mit dem Begriff der Energie assoziiert wird. Das Ergebnis, was in **Abbildung 28** gezeigt wird, zeigte, dass sehr viele Energieformen genannt werden konnten und überwiegend physikalische Termini fielen (Duit, 1986, S. 255). Gleichzeitig kamen Begriffe wie Energieumwandlung, Energieentwertung oder Energieerhaltung nicht vor, obwohl dies Vorgänge sind, die unseren Alltag bestimmen (Duit, 1986, S. 255). Aus diesem Grund ist es wichtig, diese Themen vermehrt zu behandeln und den Energiebegriff näher an reale Sachverhalte heranzuführen.

Solche realen Themen sind Energieumwandlungsprozesse, die zum Beispiel in Maschinen stattfinden. Energieumwandlungsprozesse werden in Energieflussdiagrammen dargestellt. Dies geschieht oft durch Pfeile, die von einer Energie zur nächsten führen. Die Pfeile werden hierbei, wie in **Abbildung 29** zu sehen ist, immer dünner, um die Differenz der entwerteten Energie ΔE darzustellen. Diese ist ebenfalls als Nebenprodukt grafisch zu sehen.

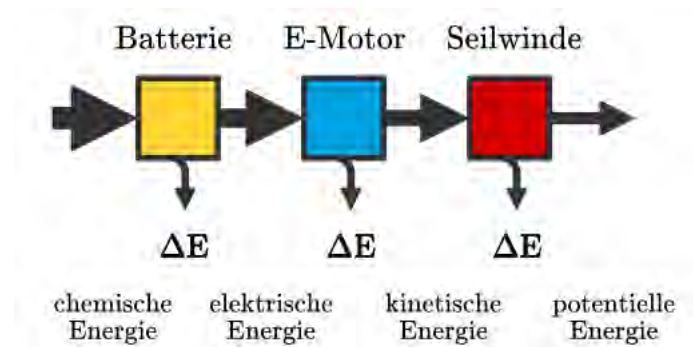


Abbildung 29:

Energieflussdiagramm,

übernommen aus *Energieumwandlung*, von LEIFIphysik, o. D., www.leifiphysik.de/mechanik/arbeitsenergie-und-leistung/grundwissen/energieumwandlung

Solche Energieumwandlungsprozesse können als einfache Experimente dargestellt werden, bei denen die Schülerinnen und Schüler Hypothesen aufstellen sollen, welche Energieformen vorliegen und in welche diese umgewandelt werden. Hierbei bietet es sich an, mehrere Experimente gleichzeitig an Stationen anzubieten, damit die Lernenden mehrere Umwandlungsprozesse untersuchen können.

Als Erweiterung kann den Schülern der Zusammenhang zwischen Arbeit und Energie noch einmal aufgezeigt werden, zum Beispiel beim Spannen eines Gummiringes oder einer Feder.

3.7.3 Integration von Lego

Mit Lego können wunderbar Energieumwandlungen durchgeführt werden. Beispielhaft werden drei Versuche gezeigt.

3.7.3.1 Balliste

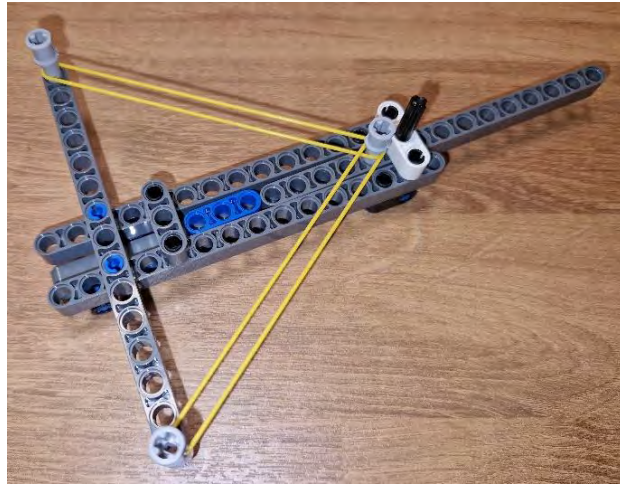


Abbildung 30:
Balliste aus Lego,
eigenes Foto

Tabelle 7:
Teileliste Balliste,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
2780	6279875	Technic, Pin with Short Friction Ridges	6
32054	6321747	Technic, Pin 3L with Friction Ridges and Stop Bush	3
32278	4542578	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	1
32278	4542576	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	4
32523	4208160	Technic, Liftarm Thick 1 x 3	3
3706	4121690	Technic, Axle 6L	1
4519	6238084	Technic, Axle 3L	2
6536	6261372	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular	4
6558	655826	Technic, Pin 3L with Friction Ridges	2
x90	70905	Rubber Belt Extra Large	2

Die Balliste ist eine antike Belagerungswaffe, die von den Römern als Skorpion bezeichnet wurde. Die Umsetzung in Lego erfolgt über einen einfachen Spannmechanismus, der mittels eines Liftarms und zweier Gummis kleine Liftarme (in **Abbildung 30** in blau) verschießen kann. Diese kleinen Liftarme werden von oben in die dafür vorgesehen Öffnung gelegt, wenn die Balliste gespannt ist. Zur Fixierung des Mechanismus dient eine Achse, die nach oben herausgezogen werden kann, um den Schussmechanismus auszulösen. In der Praxis hat es sich als sinnvoll erwiesen, gelbe oder rote Liftarme zu verschießen, da diese auf dem Boden des Unterrichtsraums besser wiederzufinden sind.

3.7.3.2 Katapult

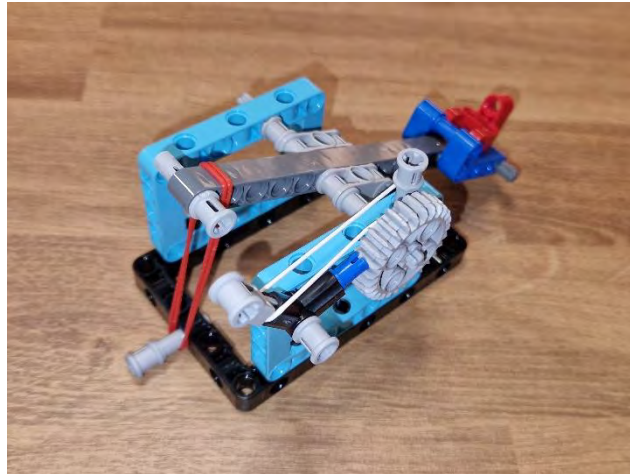


Abbildung 31:
Katapult aus Lego,
eigenes Foto

Tabelle 8:
Teileliste Katapult.
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
2780	6279875	Technic, Pin with Short Friction Ridges	6
32015	6271346	Technic, Axle and Pin Connector Angled #5	1
32054	6321747	Technic, Pin 3L with Friction Ridges and Stop Bush	3
32140	6271829	Technic, Liftarm, Modified Bent Thick L-Shape 2 x 4	2
32184	6276981	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular 3L	2
32278	4542576	Technic, Liftarm Thick 1 x 15	1
3673	4211807	Technic, Pin without Friction Ridges	1
3713	6275844	Technic Bush	2
39794	6265643	Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 7 x 11	1
42003	6273715	Technic, Axle and Pin Connector Perpendicular 3L	1
43093	4206482	Technic, Axle 1L with Pin with Friction Ridges	1
4519	4124021	Technic, Axle 3L	1
4519	4211815	Technic, Axle 3L	1
46372	6259270	Technic, Gear 28 Tooth Double Bevel	1
60485		Technic, Axle 9L	1
64179		Technic, Liftarm, Modified Frame Thick 5 x 7	2
6553	4211536	Technic, Axle 2L with Reverser Handle Axle Connector	1
6558	655826	Technic, Pin 3L with Friction Ridges	2
x71	85543	Rubber Belt Small	1
x37	70903	Rubber Belt Medium	2

Ein Katapult ist ebenfalls ein altes Belagerungsgerät und den meisten Schülerinnen aus diversen Spielen oder Filmen bekannt. Es ist ein kleiner Aufbau, der durch die großen Rahmen eine hohe Stabilität erhält. Hier können deshalb zwei Gummis zur Spannung verwendet werden. Beim Spannen wird ein Zahnrad mitgedreht, welches durch einen kleinen Mechanismus immer wieder mit einem Pin verkantet, wenn man aufhört Arbeit aufzuwenden. Der Auslöser wird durch ein kleines Gummi unter Spannung gehalten und kann durch leichtes

Drücken betätigt werden. Das Zahnrad kann somit frei drehen und das Katapult feuert beliebige Steine ab. Die Halterung für die Elemente, die verschossen werden, kann einfach verändert werden, indem das Ende des Wurfarms umgebaut wird.

3.7.3.3 Dynamo



Abbildung 32:
Dynamo Versuch mit Lego,
eigenes Foto

Tabelle 9:
Teileliste Dynmao,
erstellt mit Studio 2.0

BLID	EID	PartName	#
53787		NXT Servo Motor	1
x1676	54690	Electric Converter Cable Mindstorms NXT	1
6035c01		Electric Light Brick 1x2	5
32140	6271829	Technic, Liftarm, Modified Bent Thick L-Shape 2 x 4	2
3707	33324	Technic, Axle 8L	1
3649	34432	Technic, Gear 40 Tooth	1

Am Motor, der für einen Mindstorms NXT konzipiert wurde, ist ein Zahnrad angebracht, an dem die Schülerinnen und Schüler drehen können. Durch ein Adapterkabel ist der Motor mit einem Stein mit eingebauter Glühbirne verbunden. Es können mehrere Glühbirnen aufeinandergesetzt werden, sodass alle zusammen mit dem Motor, der als Dynamo wirkt, betrieben werden können. Dieser Versuch kann auch mit dem Wellrad betrieben werden. Hierbei muss

darauf geachtet werden, dass eine längere Achse benötigt wird und das Gewicht, welches das Wellrad antreibt, sich vom großen Rad abrollt.

3.7.4 Ergebnisse und Vergleich mit existierenden Experimenten



Abbildung 33:
Energieumwandlung Phywe,
 übernommen aus *Set Schülerversuche*
Erneuerbare Energie 3 für 10 Versuche, TESS
advanced Physik EN-FC, von PHYWE
 Systeme GmbH & Co. KG, o. D.,
www.phywe.de/versuche-sets/tess-schuelerversuche-sets/set-schuelerversuche-erneuerbare-energie-3-fuer-10-versuche-tess-advanced-physik-en-fc_2408_3339/



Abbildung 34:
Dynamo Conatex,
 übernommen aus *Handgetriebener Generator*
DynaMot, von Conatex GmbH, o. D.,
www.conatex.com/physik-lehrmittel/elektrik/motoren-generatoren/handgetriebener-generator-dynamot/handgetriebener-generator-dynamot.html

Es gibt zahlreiche Sets von Lehrmittelherstellern, die sich mit Energieumwandlungen und erneuerbaren Energien beschäftigen. Als Beispiel kann hier ein Kasten von Phywe (Art.-Nr. 25287-88) (**Abbildung 33**) genannt werden, der im Handel für 794,92 € erhältlich ist. Es gibt aber auch zahlreiche Einzelexperimente, wie den Dynamo von Conatex (Art.-Nr. 1008012) (**Abbildung 34**), der 235,62 € kostet. Die Bandbreite ist hier groß, wie auch die Preisunterschiede, die sich von unter hundert Euro bis zu mehreren tausend Euro für große Kästen erstreckt. Dafür kann auch sehr viel gezeigt werden und die Möglichkeiten zum entdeckenden Lernen sind gegeben.

Die Armbrust aus Lego kostet gebraucht 5,42 € und neu 6,92 €. Für das Katapult werden gebraucht 8,76 € und neu 9,33 € aufgerufen. Der Dynamoversuch kostet gebraucht 30,84 € und neu 66,57 €. Insbesondere beim letzteren Versuch ist auf den Zustand des Motors zu achten. Im gebrauchten Zustand ist hier tatsächlich

das Kabel am teuersten. Sollten andere Lego-Motoren vorhanden sein, kann hier auch mit diesen gearbeitet werden.

Armbrust und Katapult funktionieren beide wie erhofft, wobei man insbesondere beim Katapult mit zunehmender Dehnung der Gummis eine erhöhte Kraft aufbringen muss, um den Mechanismus weiter zu spannen. Beide Auslösemechanismen funktionieren einwandfrei.

Eine Birne kann durch den Dynamoversuch problemlos zum Leuchten gebracht werden. Wenn man 5 Birnen aufeinander steckt, spürt man, dass beim Drehen eindeutig mehr Kraft aufgebracht werden muss, was einer erhöhten Arbeit entspricht, die aufgewendet werden muss, um den erhöhten Energiebedarf der leuchtenden Birnen zu decken. Der Versuch kann problemlos mit dem Wellrad kombiniert werden, wobei man darauf achten muss, genügend Gewichte anzuhängen. Empfehlenswert sind am großen Rad 0,3kg, um eine Birne zu betreiben. Es kann auch mit mehreren Birnen und verschiedenen Massen experimentiert werden, was den Zusammenhang zwischen Kraft und aufzubringender Arbeit verdeutlicht.

3.7.5 Reflexion und Optimierung

Die Versuche schaffen es spielerisch Energieumwandlungen zu beobachten und vor allem wahrnehmbar zu machen. Auf jeden Fall muss darauf geachtet werden, dass diese nicht zu wahrnehmbar werden und bei möglichen Abschussvorrichtungen, wie zum Beispiel der Balliste und dem Katapult NICHT auf Menschen gezielt wird. Es bietet sich an, die Versuche in Richtung Tafel, im Gang oder im Freien durchzuführen, wenn Schülerinnen und Schüler ihn bedienen. Dass beide Versuche sehr ähnlich sind, muss nicht störend sein, da bei einem waagerechten Abschuss das Katapult und die Balliste sich in der zuerst zunehmenden potenziellen Energie des Katapultprojektils unterscheiden. Für diese Feinheit bietet es sich an beide Versuche durchführen lassen. Insbesondere der Katapultversuch kann sich perspektivisch für eine Videoanalyse des schrägen Wurfs nach oben gut eignen. Hierbei kann eine Stoppstange helfen, um das Projektil in einem steileren Winkel nach oben zu schießen, indem der Wurfarm frühzeitig abgebremst wird.

Der Dynamo Versuch funktioniert ebenfalls sehr gut, insbesondere mit mehreren Lampen. Eine Anbindung an den Wellradversuch ermöglicht eine bekannte Maschine mit einem neuen Experiment zu verbinden und zeigt nicht nur das Baukastensystem von Lego, sondern auch das der Physik. Es kann Altes mit Neuem verbunden werden. Hierbei kann sich daran erinnert werden, welche Seite des Wellrades verwendet werden sollte, um den Dynamo anzutreiben. Da die Kabel und auch der Motor, wenn man ihn neu kauft, teuer sind, wenngleich nicht so teuer wie die der Lehrmittelhersteller, können hier perspektivisch auch andere Motoren verwendet werden.

Auf lange Sicht gibt es unzählige Energiewandler, die mit Lego gebaut werden können, wie zum Beispiel ein Auto mit Rückzugsmotor, für das eine Anleitung ebenfalls im Anhang zu finden ist.

4. Fazit und Ausblick

Die Umsetzung von physikalischen Experimenten mit Lego ist, wie diese Arbeit untersucht hat, sehr gut möglich. Lego kann durch seine Modularität und Interaktivität einen spielerischen Zugang zu physikalischen Themen bieten. Hierbei ist Lego nicht nur ein Spielzeug, sondern vollwertiger Ersatz für gängige Unterrichtsmaterialien anderer Firmen. Dies wurde vor allem anhand solider Ergebnisse der Experimente mit Lego unterstrichen.

Diese Arbeit verdeutlicht außerdem, dass es sich für Lehrerinnen und Lehrer lohnen kann, sich mit alternativen Materialien zu beschäftigen. Insbesondere die knappen Budgets der Schulen sind ein wichtiger Aspekt, Experimente mit Lego in Betracht zu ziehen, obwohl viel über die Preispolitik von Lego im Internet und anderen Medien gesprochen wird. Es können je nach Versuch ganze Klassensätze eines Experiments bestellt werden, dem ein einzelner Lehrmittel-Versuch gegenübersteht. Eine höhere Versuchsvielfalt ist durch geringere Kosten ebenfalls anzustreben. Die flexible Nutzung von Lego bietet außerdem die Möglichkeit freies Experimentieren oder das eigenständige Abändern von Experimenten zu vereinfachen. Es bleibt abzuwarten, ob hier ein Konkurrenzdruck auf Lehrmittelfirmen entstehen kann.

Mögliche Nachteile sind, dass ein Auf- und Abbau mitsamt Einsortieren der Teile in Kästen Zeit kostet und sich sehr leicht ein Kleinteil-Schwund einstellt. Dieser muss nicht durch Diebstahl entstehen, sondern durch Fallen- oder Liegenlassen. Es lohnt sich ein abschließender Rundgang durch den Raum. Die Teilebestellung samt Einsortieren kann einmal auch mehr Arbeit erzeugen als bei vorgefertigten Versuchen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen es Personen in Schulen und Universitäten ermöglichen, Lego-Experimente anzuwenden und im Unterricht zu erproben. Hierbei ergeben sich zahlreiche Perspektiven für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten:

Eine mögliche Erweiterung der Themenvielfalt und der Experimentvielfalt ist an sich wünschenswert. Insbesondere mögliche Experimente in der Thermodynamik und Optik für die Sekundarstufen bieten ein spannendes Gebiet. Eine zusätzliche Integration von digitalen Technologien, wie Spike oder

Mindstorms wurde vereinzelt bereits in wissenschaftlichen Arbeiten aufgegriffen, die Themenvielfalt ist hier aber sehr beschränkt. Eine Langzeitstudie mit kooperierenden Schulen könnte von Bedeutung sein, um die Wirkung von Lego-Experimenten auf das physikalische Verständnis und die Motivation der Schülerinnen und Schüler zu untersuchen. Darauf basierend wäre auch eine stärkere Einbindung von Lego in die universitäre Ausbildung von Lehrerinnen und Lehrer erstrebenswert.

Abschließend lässt sich festhalten, dass Lego mit der richtigen Konzeption eine sinnvolle Ergänzung im Physikunterricht sein kann und einem Einsatz nichts im Wege stehen sollte. Es bleibt zu hoffen, dass weitere Arbeiten und Studien in dieser Richtung in Zukunft erfolgen werden.

5. Literaturverzeichnis

- ARD alpha. (2022, 17. Oktober). *Gebundene Rotation: Die immer gleiche Seite des Mondes*. Abgerufen am 25. März 2025, von <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/sterngucker/mond-gebundene-rotation-erde-gleiche-seite-eigene-achse-libration-100.html>
- Berge, O. E. (1982). *Spielzeug im Physikunterricht: Materialsammlung für physikalisch-technische Untersuchungen in Sekundarstufe I und Sekundarstufe II*. Quelle & Meyer.
- Conatex GmbH. (o. D.). *Handgetriebener Generator DynaMot*. Abgerufen am 15. April 2025, von www.conatex.com/physik-lehrmittel/elektrik/motoren-generatoren/handgetriebener-generator-dynamot/handgetriebener-generator-dynamot.html
- Conatex GmbH. (o. D.). *Rollenfahrbahn Komplettsset 1,4 m*. Abgerufen am 28. März 2025, von www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/rollenfahrbahn-komplettsysteme/rollenfahrbahn-komplettsset-1-4-m.html
- Conatex GmbH. (o. D.). *Zentralkraft-Gerät Versuch*. Abgerufen am 10. April 2025, von www.conatex.com/physik-lehrmittel/mechanik/kraefte-statik-dynamik/zentralkraft-geraet-versuch.html
- Cornelsen Experimenta. (o. D.). *31115 Tellurium N*. Abgerufen am 25. März 2025, von www.cornelsen-experimenta.de/shop/de/Grundschule/Sachunterricht/Geographie/31115-Tellurium+N.html
- Cornelsen Verlag. (2014, 3. Januar). *Cornelsen Experimenta – Tellurium* [Video]. YouTube. Abgerufen am 25. März 2025 von https://www.youtube.com/watch?v=cebb6fjL_qo
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (o. D.). *Die seltsame Rotation der Sonne*. Abgerufen am 25. März 2025, von <https://www.dlr.de/de/next/schule-und-ausbildung/lernmodule/sonne/die-seltsame-rotation-der-sonne>
- Duit, R. (1986). *Der Energiebegriff im Physikunterricht (IPN-Arbeitsberichte Nr. 100)*. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Girwidz, R. (2015). *Medien im Physikunterricht*. In E. Kircher (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (3. Aufl., S. 193–246). Springer Spektrum.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2009). *Physik* (2. Aufl., übersetzt und herausgegeben von S. W. Koch). Wiley-VCH.
- Hessisches Kultusministerium. (2018). *Hessisches Amtsblatt für Bildung und Erziehung*, 11, 1–16. Abgerufen am 07. März 2025, von https://hessisches-amtsblatt.de/wp-content/uploads/online_pdf/pdf_2018/11_2018.pdf
- Hessisches Kultusministerium. (2024, Februar). *Kerncurriculum Physik für die Hauptschule: Bildungsstandards und Inhaltsfelder Sekundarstufe I*. Abgerufen am 03. März 2025, von https://kultus.hessen.de/sites/kultus.hessen.de/files/2024-02/kc_physik_hsa_201102-uea.pdf
- Hessisches Ministerium für Kultus, Bildung und Chancen. (2024). *Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe – Physik*. Abgerufen am 03. März 2025, von https://kultus.hessen.de/sites/kultus.hessen.de/files/2024-11/kerncurriculum_gymnasiale_oberstufe-physik.pdf
- Kircher, E. (Hrsg.). (2015). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (3. Aufl.). Springer Spektrum.
- Kluge, R. (1973). *Spielzeuge als Zugang zur Physik*. Diesterweg.
- Köster, H. (Hrsg.). (2010). *Handbuch Experimentieren (1. Aufl.)*. Schneider Verlag Hohengehren.
- LEGO GmbH. (o. D.). *Sonne Erde Mond Modell 42179*. Abgerufen am 25. März 2025, von www.lego.com/de-de/product/planet-earth-and-moon-in-orbit-42179

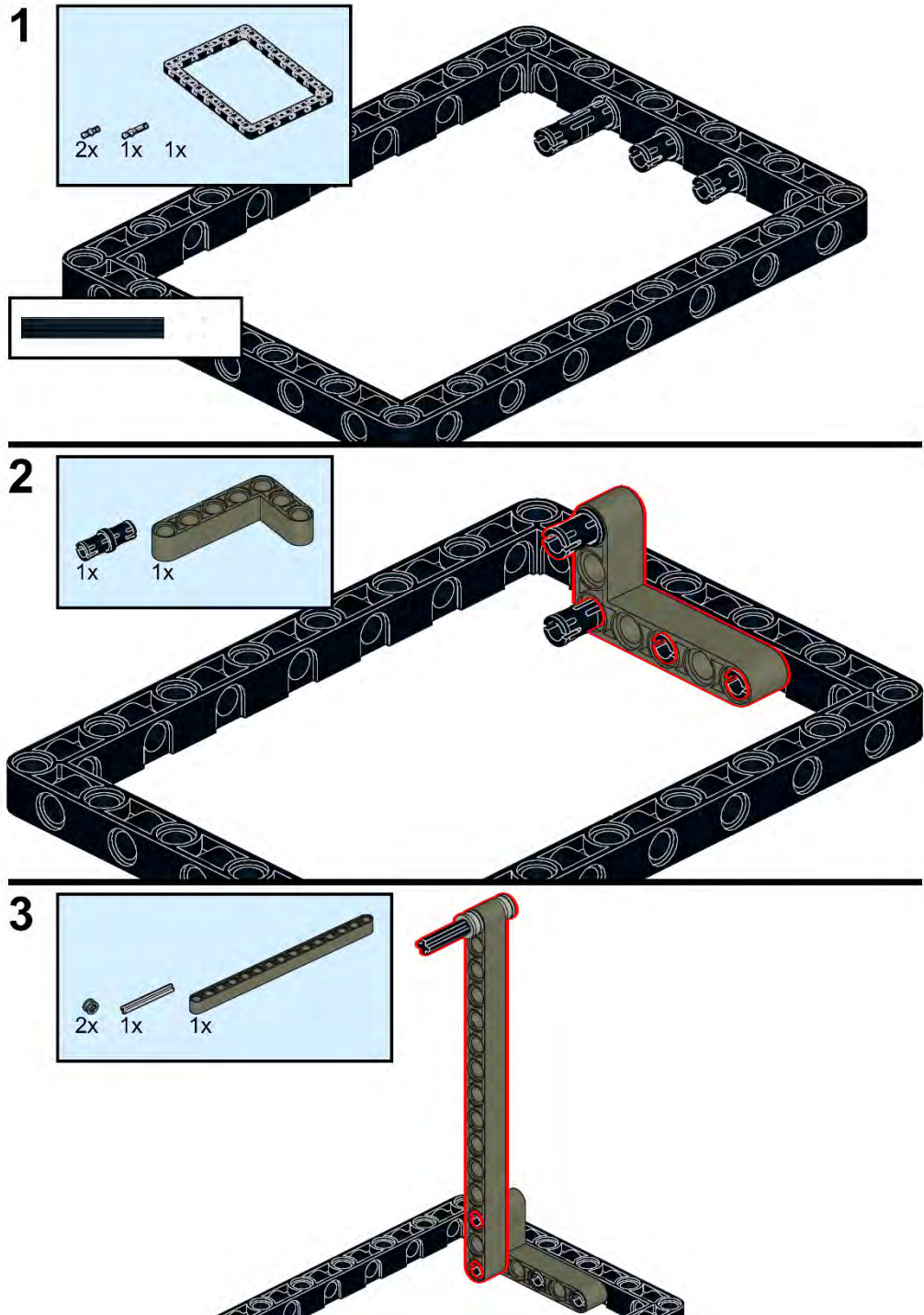
- LEIFIphysik. (o. D.). *Energieumwandlung*. Abgerufen am 15. April 2025, von www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/grundwissen/energieumwandlung
- LEIFIphysik. (o. D.-a). *Charakterisierung der gleichförmigen Kreisbewegung*. Abgerufen am 10. April 2025, von <https://www.leifiphysik.de/mechanik/kreisbewegung/grundwissen/charakterisierung-der-gleichfoermigen-kreisbewegung>
- Leybold Didactic GmbH. (o. D.). *VP1.2.3.2 Wellrad*. Abgerufen am 15. März 2025, von www.leybold-shop.de/vp1-2-3-2.html
- Merzyn, G. (2008). *Naturwissenschaften, Mathematik, Technik – immer unbeliebter? Die Konkurrenz von Schulfächern um das Interesse der Jugend im Spiegel vielfältiger Untersuchungen*. Schneider Verlag Hohengehren.
- Mikelskis-Seifert, S. (Hrsg.). (2007). *Physik-Methodik: Handbuch für die Sekundarstufe I und II (1. Aufl.)*. Cornelsen Scriptor.
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.-a). *Das zweite Newton'sche Gesetz mit der Rollenfahrbahn und measure Dynamics* (Versuchsanleitung Nr. P2130380). Abgerufen am 28. März 2025, von https://www.phywe.de/versuche-sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Einseitiger Hebel*. Abgerufen am 22. März 2025, von www.phywe.de/versuche-sets/schuelerversuche/einseitiger-hebel_9695_10626/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Flaschenzug mit 4 Rollen*. Abgerufen am 21. März 2025, von www.phywe.de/versuche-sets/schuelerversuche/flaschenzug-mit-4-rollen_9692_10623/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Hebel*. Abgerufen am 22. März 2025, von www.phywe.de/physik/mechanik/stoff-materialeigenschaften/hebel_689_1620/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Rollbahn – Zweites Newtonsches Gesetz / Rollenfahrbahn mit measure Dynamics*. Abgerufen am 28. März 2025, von www.phywe.de/versuche-sets/hochschulversuche/zweites-newtonsches-gesetz-rollenfahrbahn-mit-measure-dynamics_10166_11097/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Set Schülerversuche Erneuerbare Energie 3 für 10 Versuche, TESS advanced Physik EN-FC*. Abgerufen am 15. April 2025, von www.phywe.de/versuche-sets/tess-schuelerversuche-sets/set-schuelerversuche-erneuerbare-energie-3-fuer-10-versuche-tess-advanced-physik-en-fc_2408_3339/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Tellurium, beleuchtet*. Abgerufen am 25. März 2025, von www.phywe.de/physik/licht-und-optik/lichtausbreitung/tellurium-beleuchtet_17501_19504/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Wellrad*. Abgerufen am 15. März 2025, von www.phywe.de/versuche-sets/versuche-fuer-sekundarstufe-i/wellrad_9412_10343/
- PHYWE Systeme GmbH & Co. KG. (o. D.). *Zentrifugalkraft mit Cobra SMARTsense*. Abgerufen am 10. April 2025, von www.phywe.de/physik/mechanik/kreisbewegung-rotation/zentrifugalkraft-mit-cobra-smartsense_26197_28203/
- Simonyi, K. (2004). *Kultugeschichte der Physik: Von den Anfängen bis heute (3., überarb. und erw. Aufl.)*. Verlag Harri Deutsch.
- Sonnenfinsternis.org. (o. D.). *Totale Sonnenfinsternis am 03.09.2081*. Abgerufen am 25. März 2025, von <https://www.sonnenfinsternis.org/sofi2081/>
- Spektrum der Wissenschaft. (o. D.). *Energie. In Lexikon der Physik*. Abgerufen am 16. April 2025, von <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/energie/4311>
- Statista. (2024, Januar). *Umsatz der größten Spielzeughersteller der Welt im Jahr 2023*. Abgerufen am 09. März 2025, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/248978/umfrage/umsatz-der-groessten-spielzeugfirmen-welweit/>

- Suhr, W. (2010). *Experimentieren – Erwartungsvolles Suchen nach dem Verlässlichen*. In H. Köster (Hrsg.), *Handbuch Experimentieren* (S. 3–18). Schneider Verlag Hohengehren.
- The Harris Poll. (2019, 16. Juli). *LEGO Group Kicks Off Global Program To Inspire The Next Generation Of Space Explorers As NASA Celebrates 50 Years Of Moon Landing*. Abgerufen am 26. März 2025, von <https://theharrispoll.com/briefs/lego-group-kicks-off-global-program-to-inspire-the-next-generation-of-space-explorers-as-nasa-celebrates-50-years-of-moon-landing/>
- Universität Osnabrück. (o. D.). *myphotonics*. Abgerufen am 07. März 2025, von <https://www.ufp.uni-osnabrueck.de/en/education/myphotonics.html>
- Wikipedia. (o. D.). *Burg Ronneburg*. Abgerufen am 15. März 2025, von de.wikipedia.org/wiki/Burg_Ronneburg
- Wikipedia. (o. D.). *Wellrad*. Abgerufen am 15. März 2025, von de.wikipedia.org/wiki/Wellrad

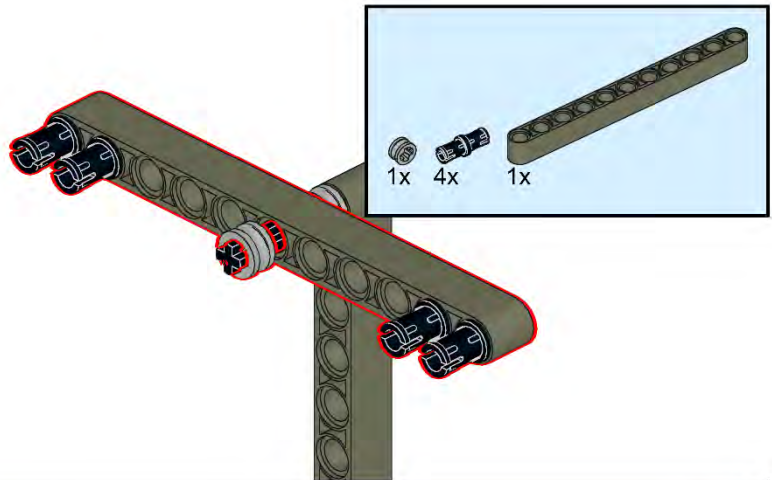
6. Anhang

A.1	Anleitung zum zweiseitigen Hebel	75
A.2	Anleitung zum Flaschenzug	77
A.3	Anleitung zum Wellrad	82
A.4	Anleitung zur Kreisbewegung	84
A.5	Anleitung zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung	93
A.6	Anleitung zur Balliste	97
A.7	Anleitung zum Katapult.....	99
A.8	Anleitung zum Auto mit Rückzugsmotor	102

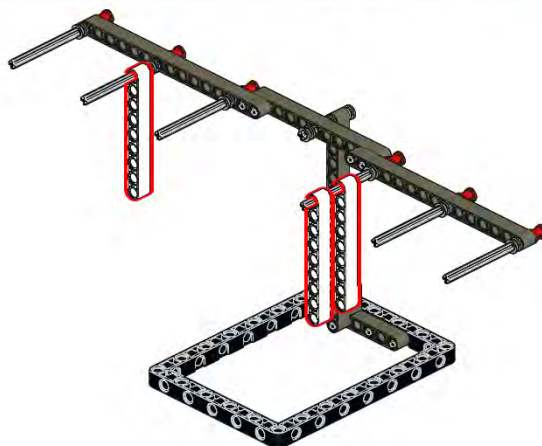
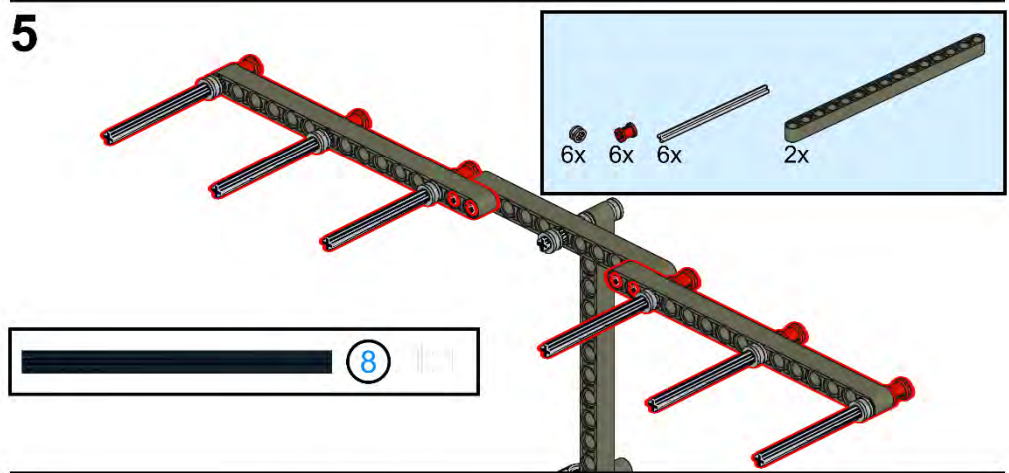
A.1 Anleitung zum zweiseitigen Hebel



4

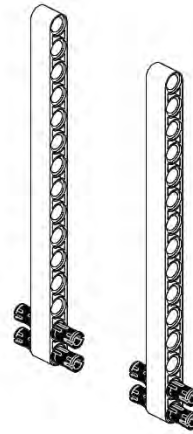
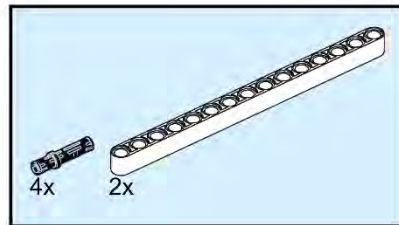


5

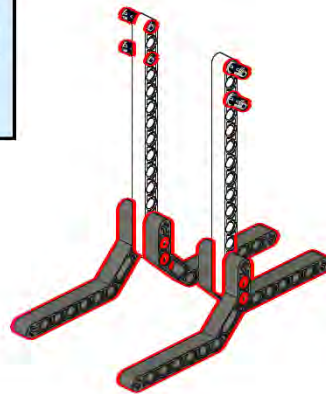


A.2 Anleitung zum Flaschenzug

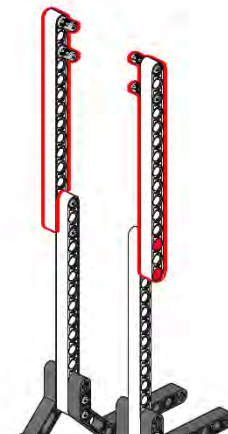
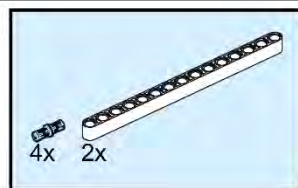
1



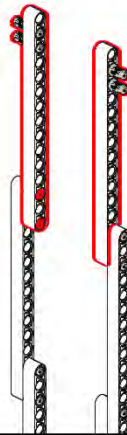
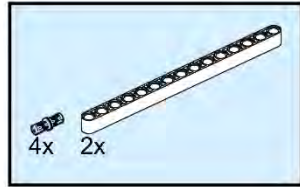
2



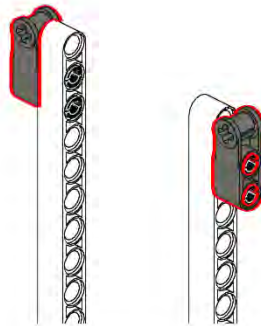
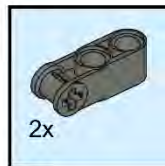
3



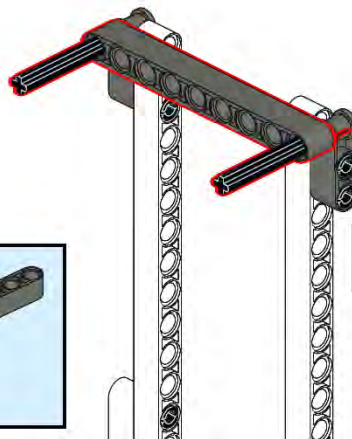
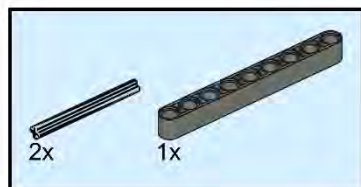
4



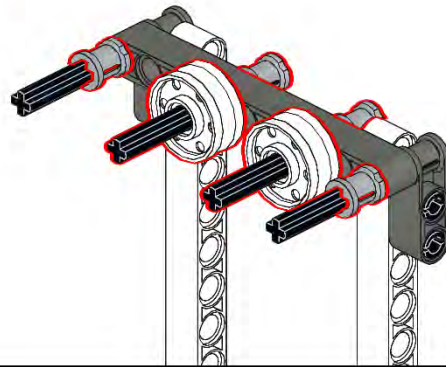
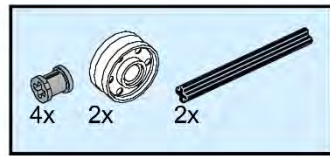
5



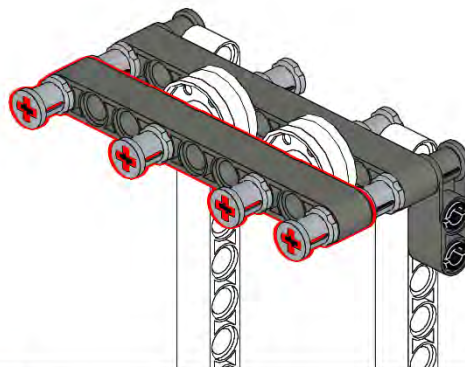
6



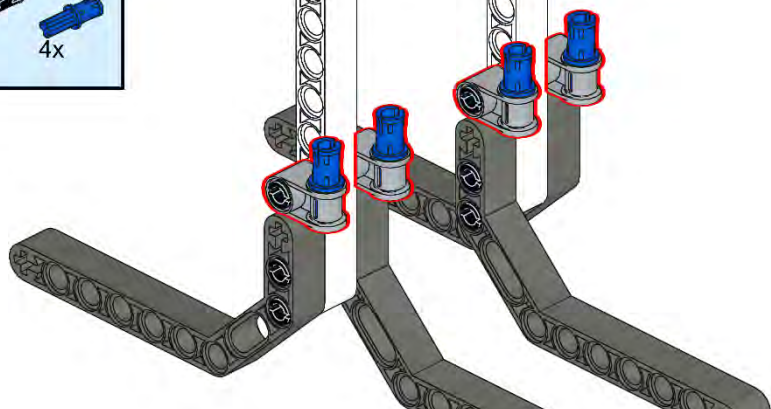
7



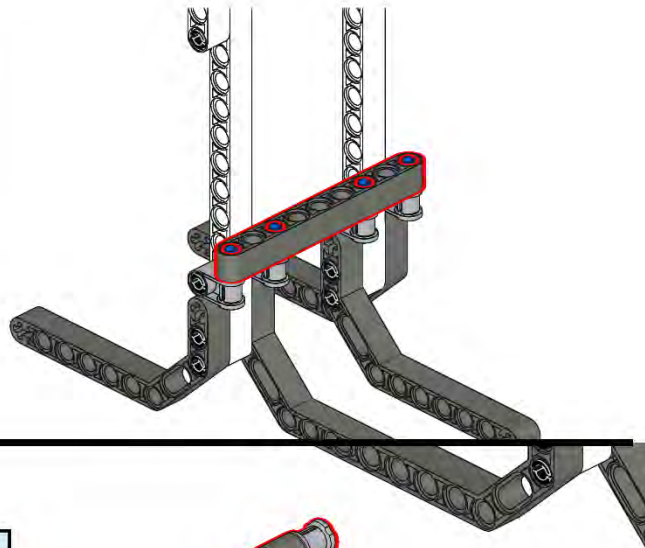
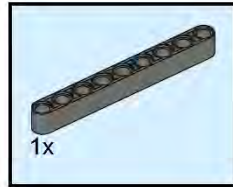
8



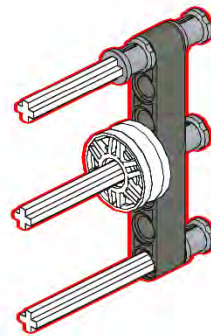
9



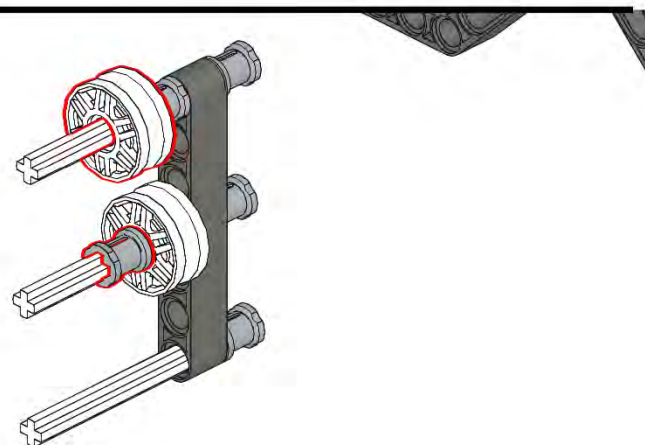
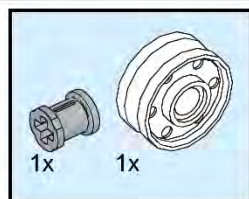
10



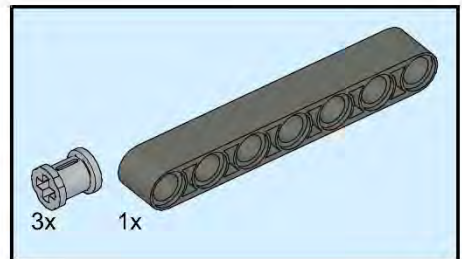
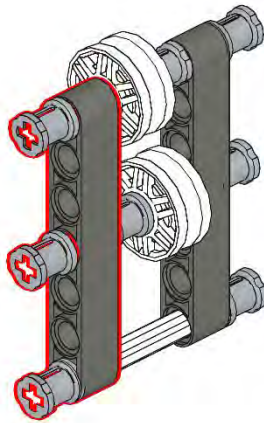
11



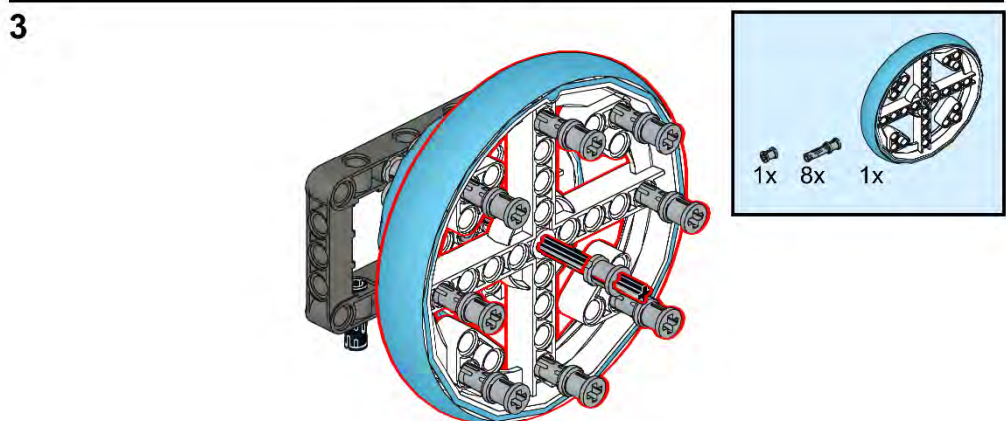
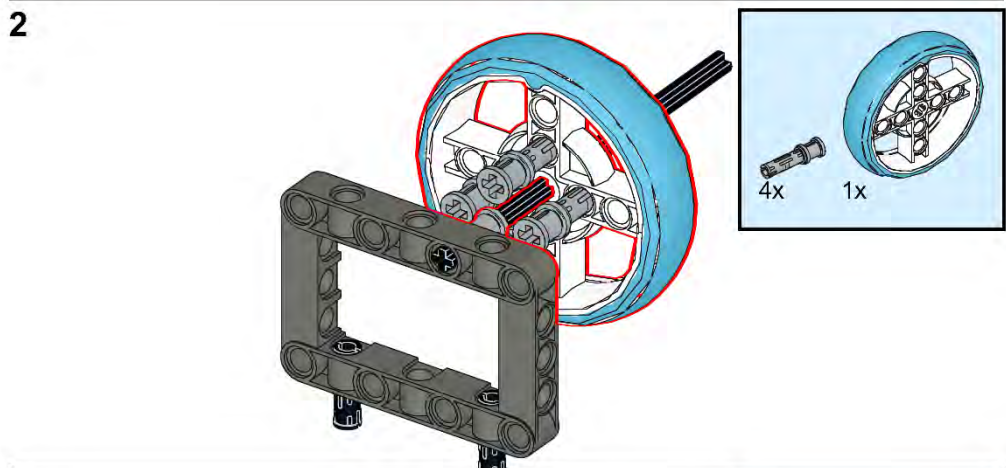
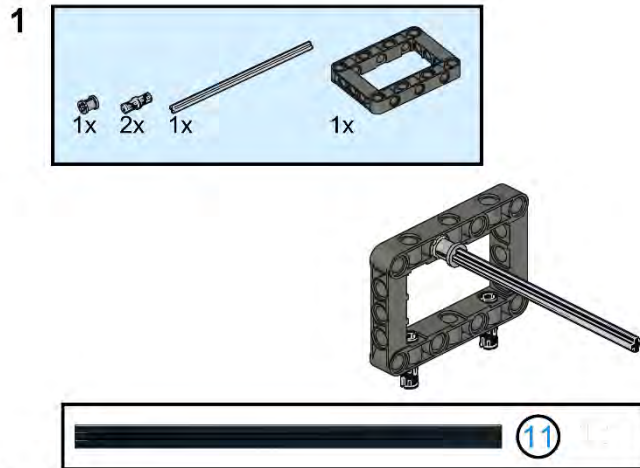
12



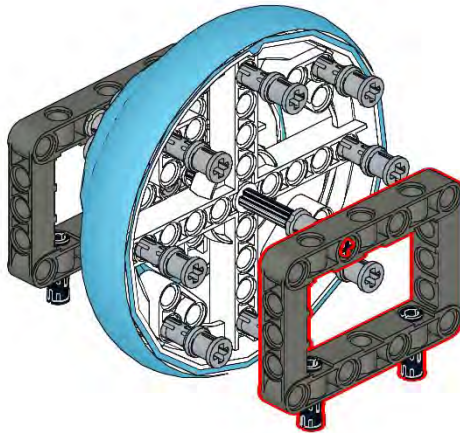
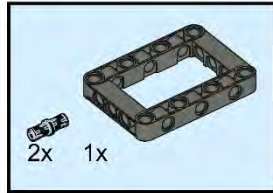
13



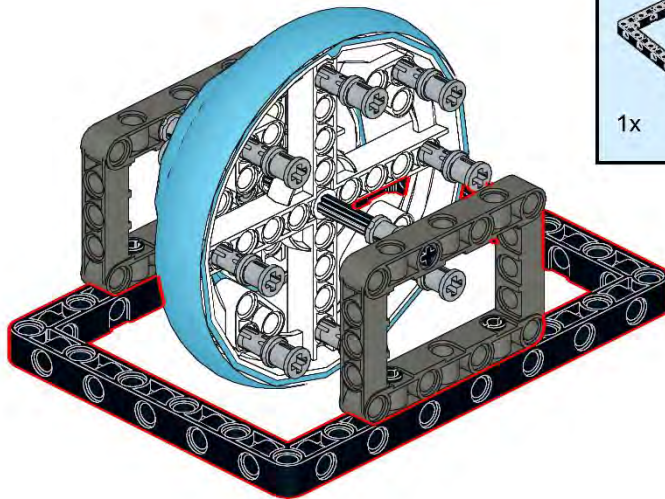
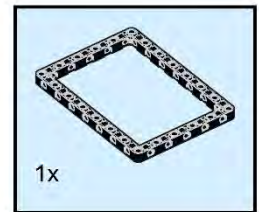
A.3 Anleitung zum Wellrad



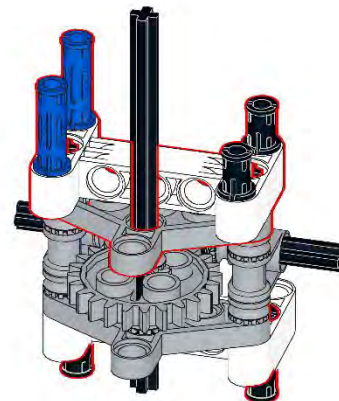
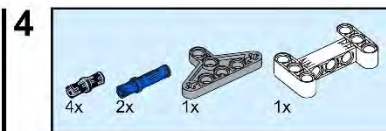
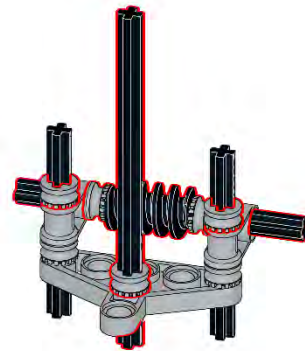
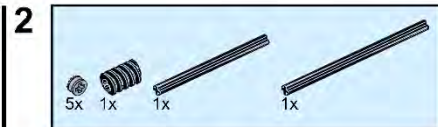
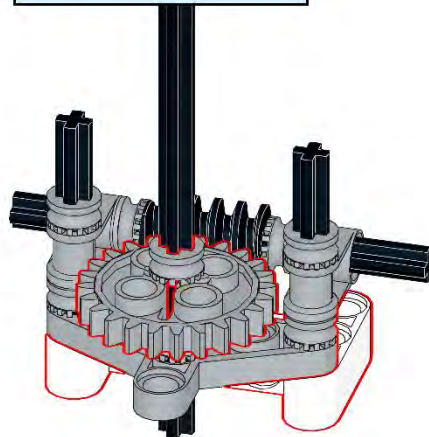
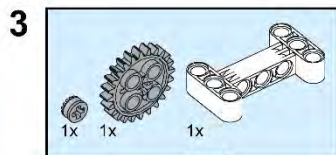
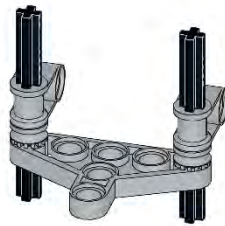
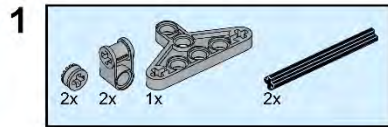
4



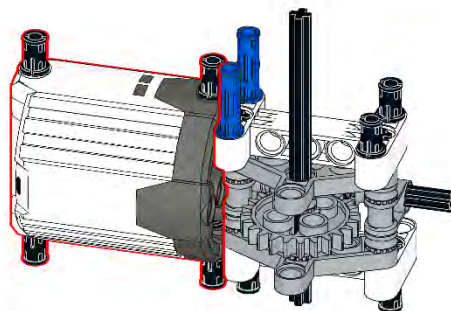
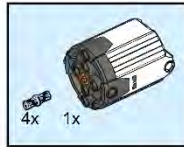
5



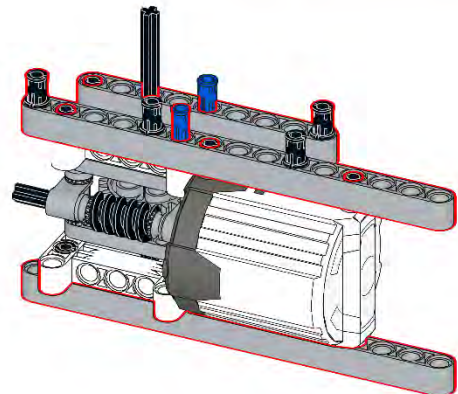
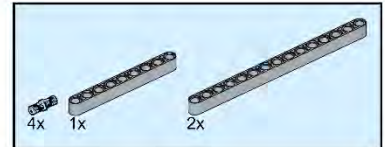
A.4 Anleitung zur Kreisbewegung



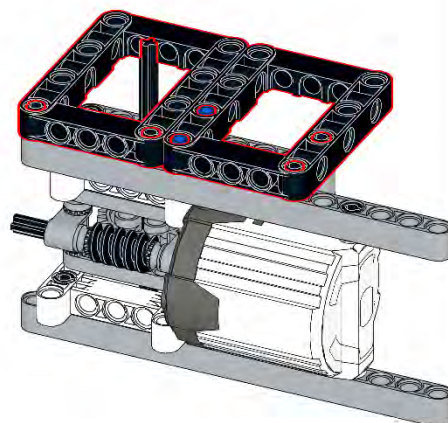
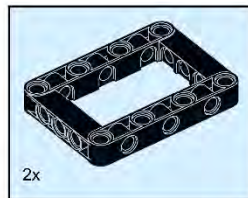
5



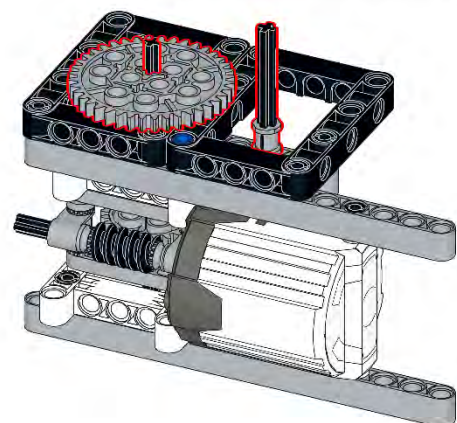
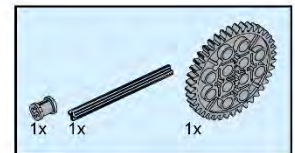
6

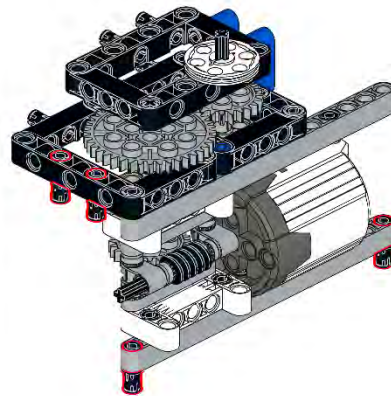
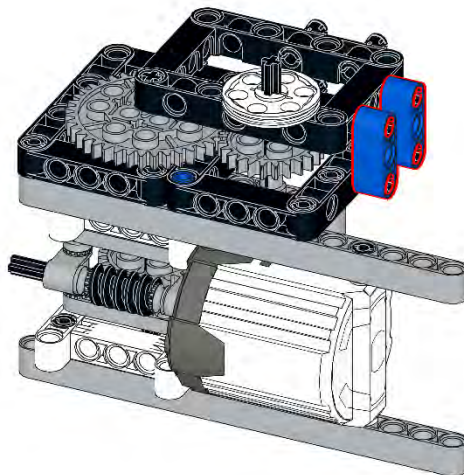
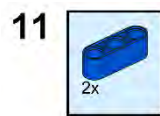
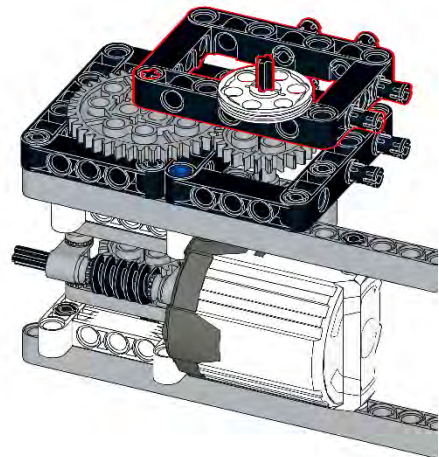
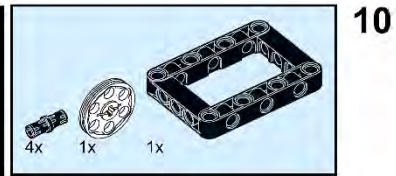
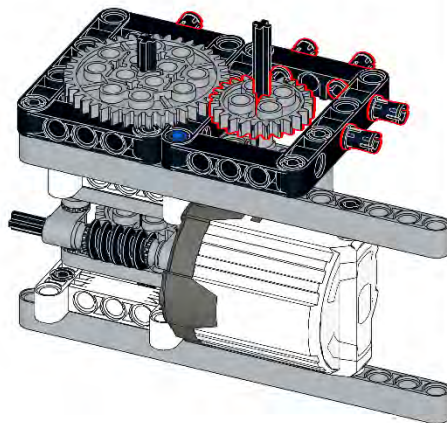
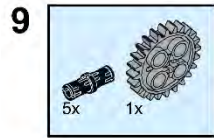


7

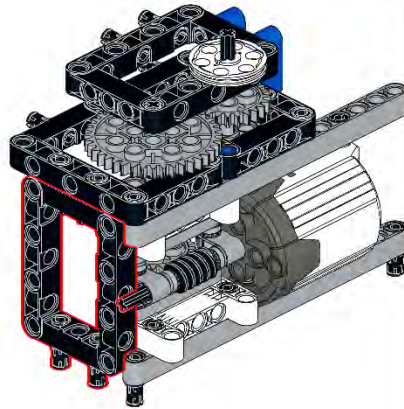
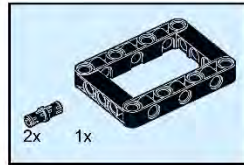


8

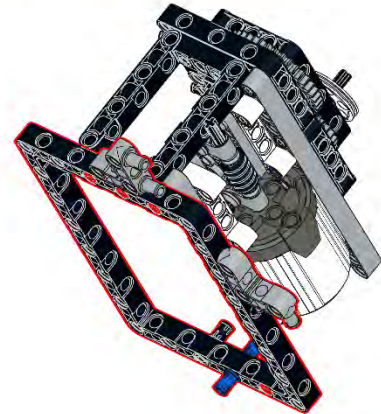
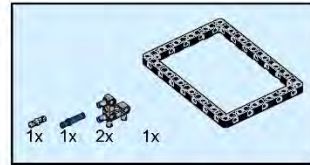




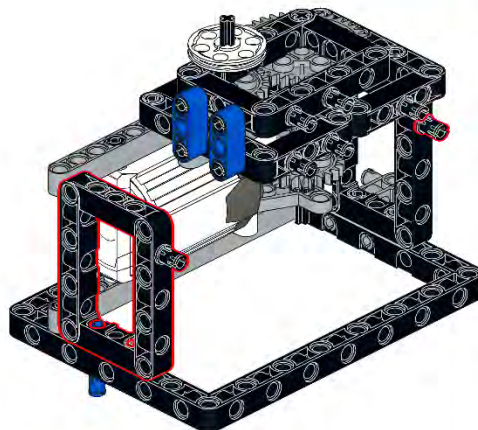
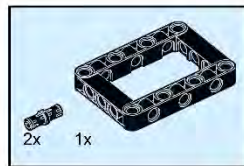
13



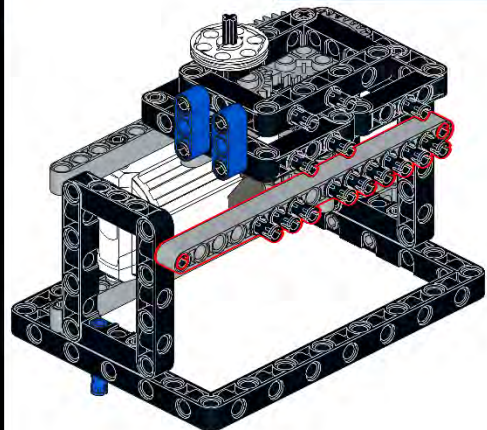
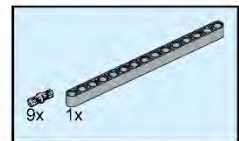
14

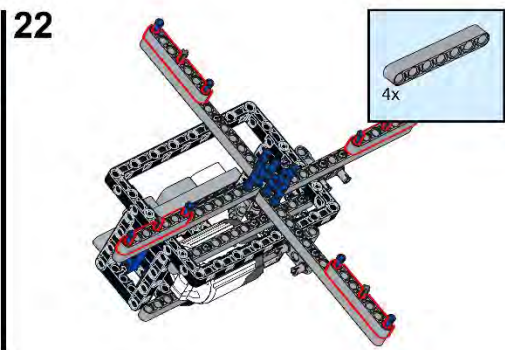
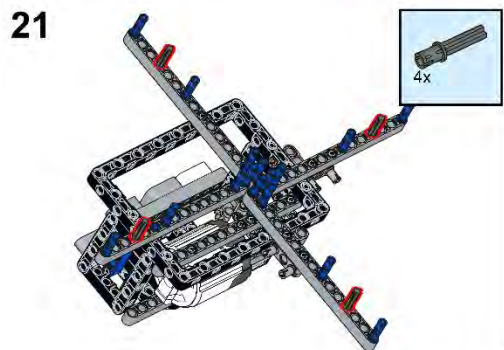
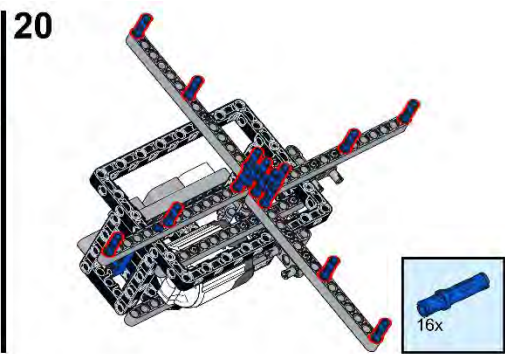
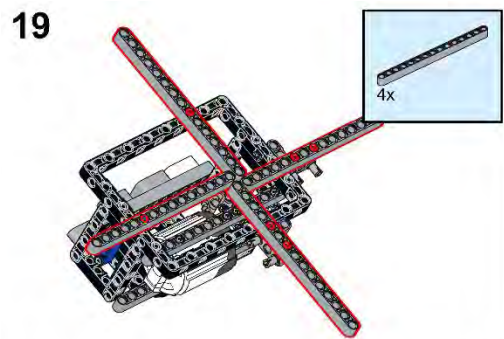
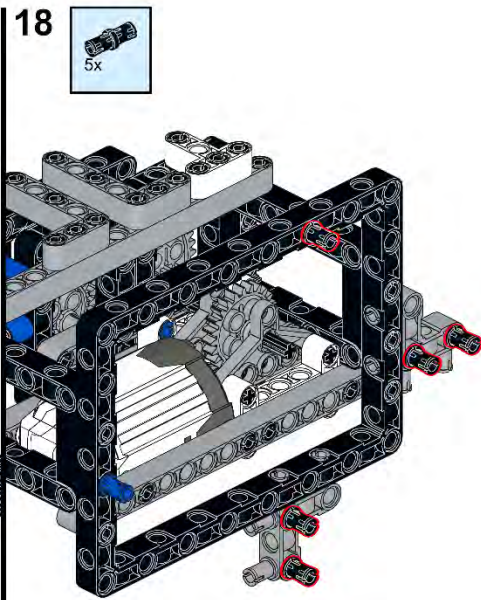
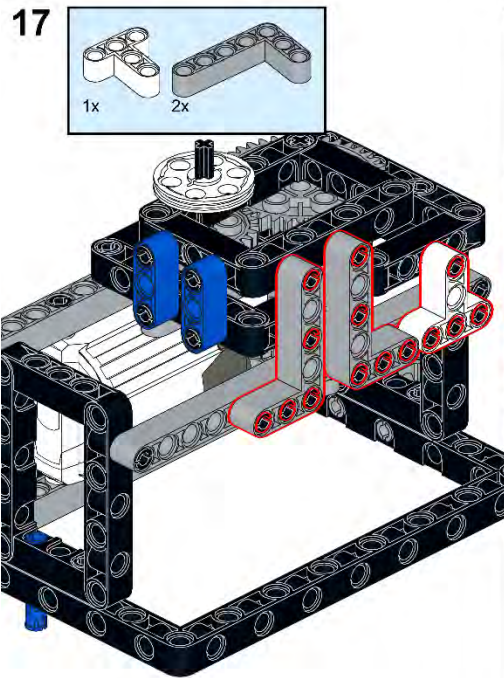


15

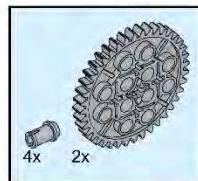
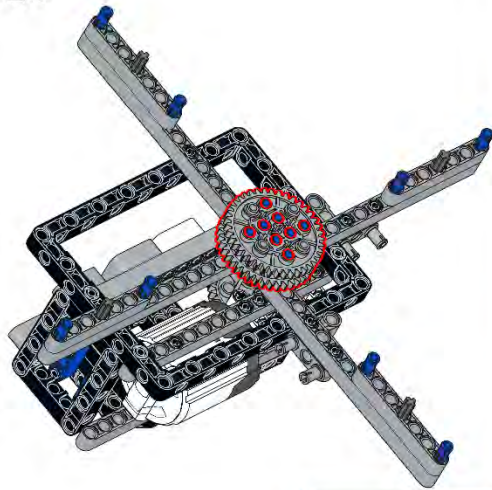


16

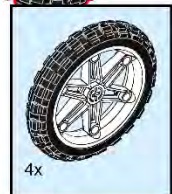
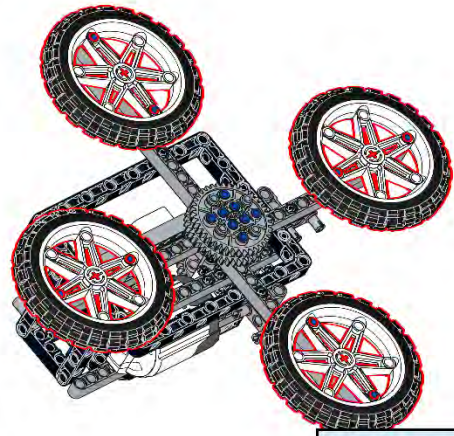




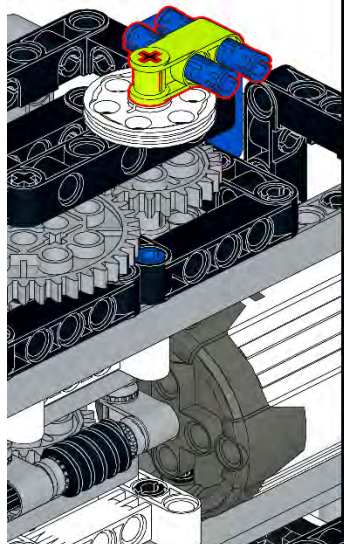
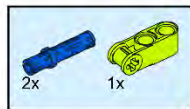
23



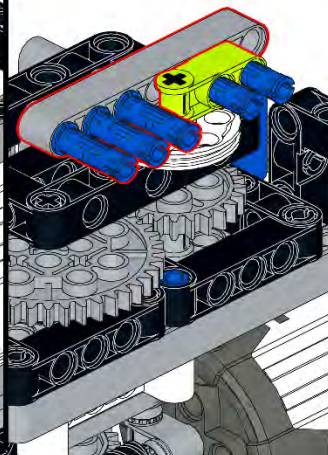
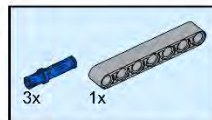
24



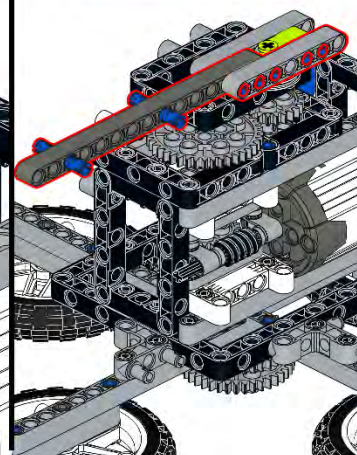
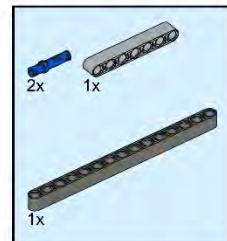
25



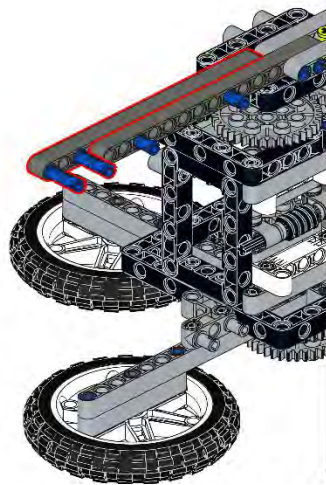
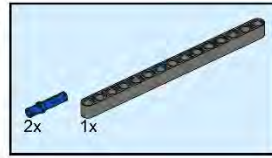
26



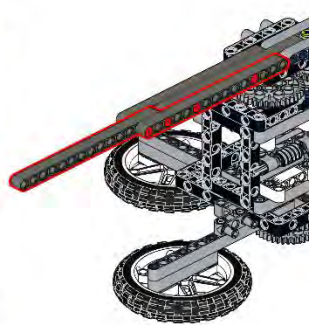
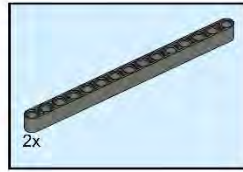
27



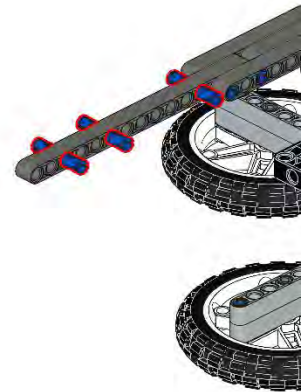
28



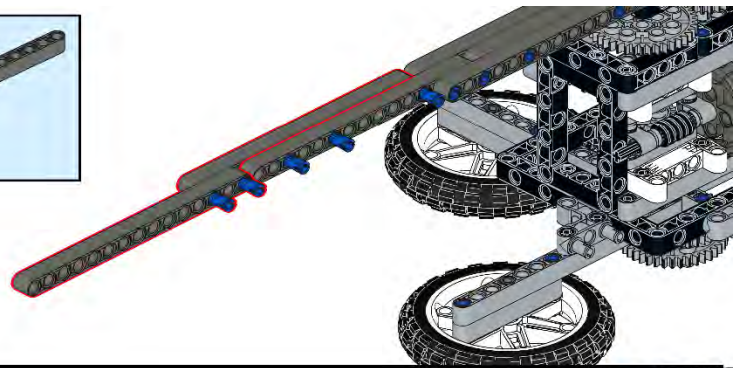
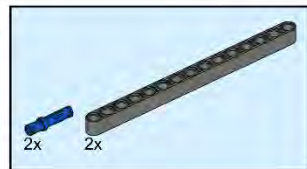
29



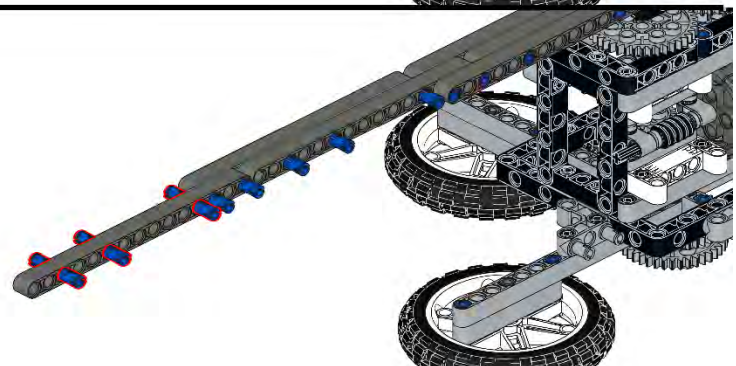
30

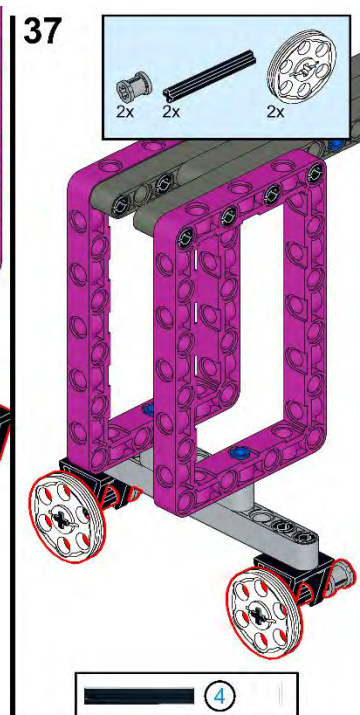
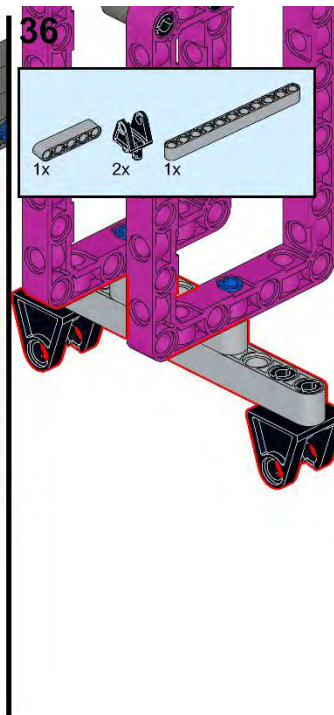
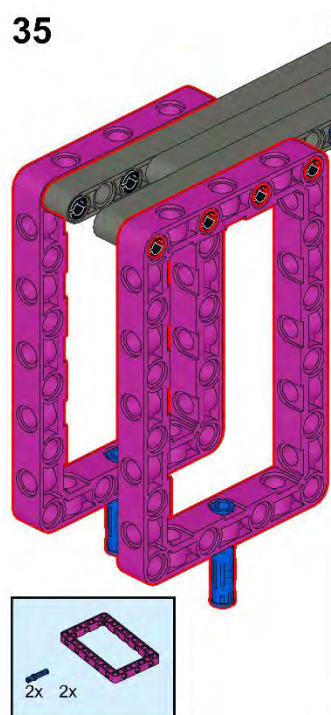
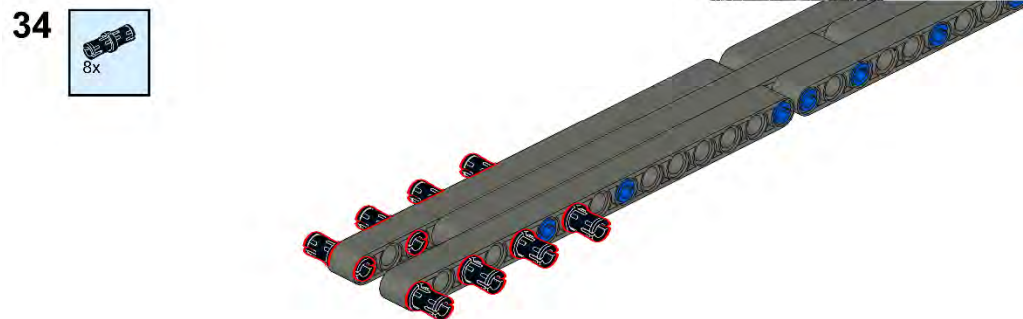
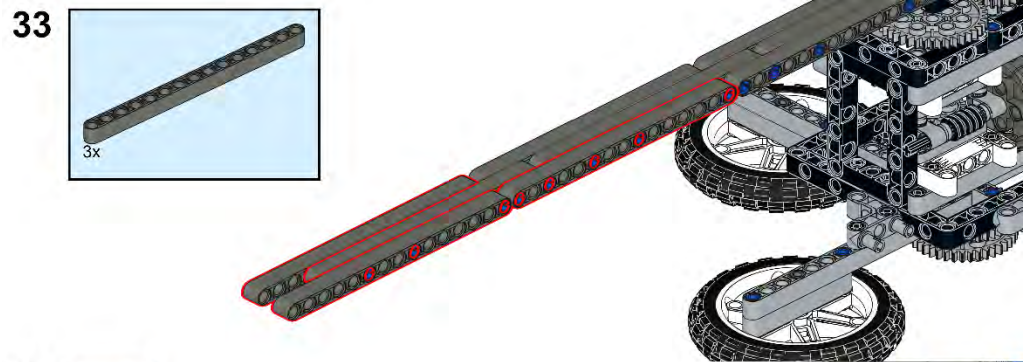


31

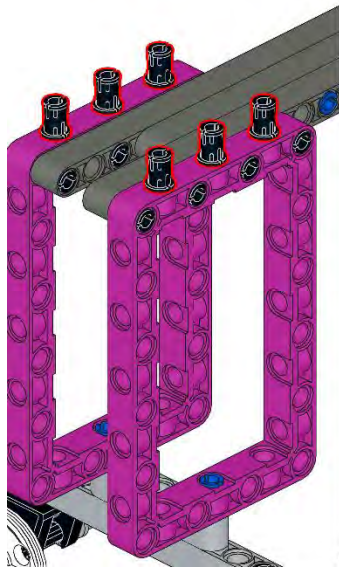


32

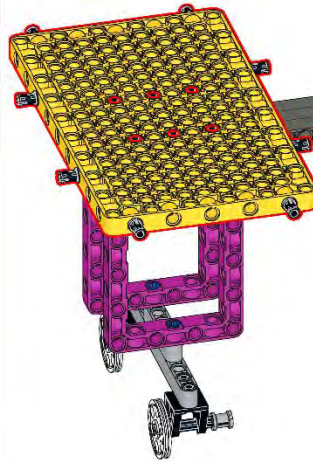
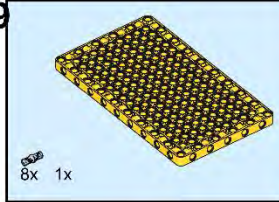




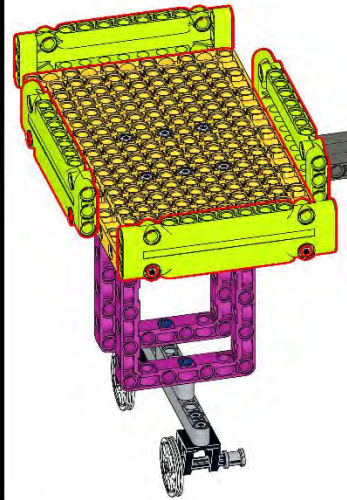
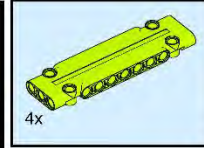
38



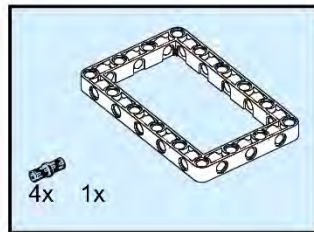
39



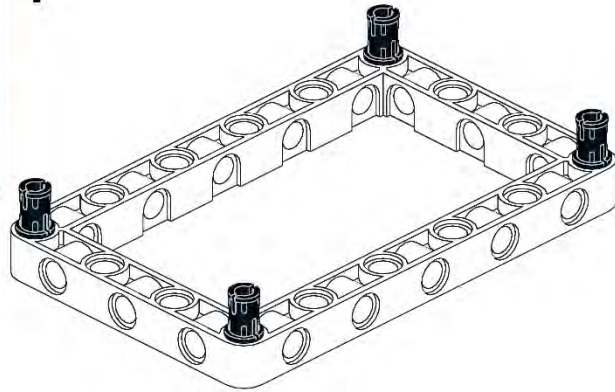
40



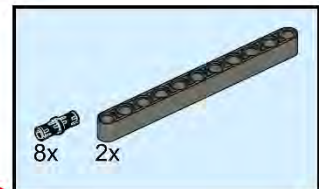
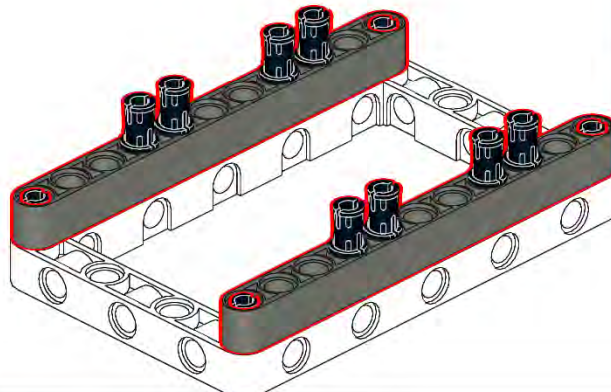
A.5 Anleitung zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung



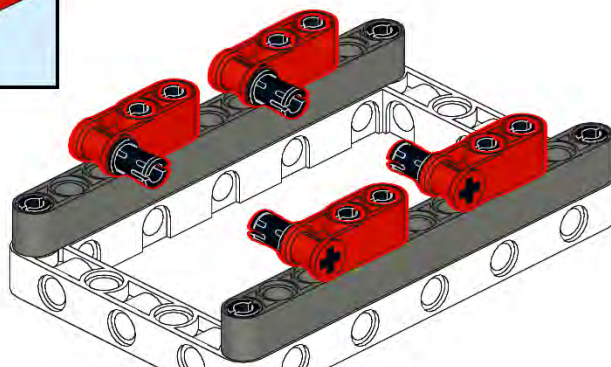
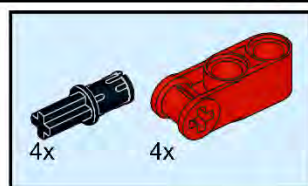
1



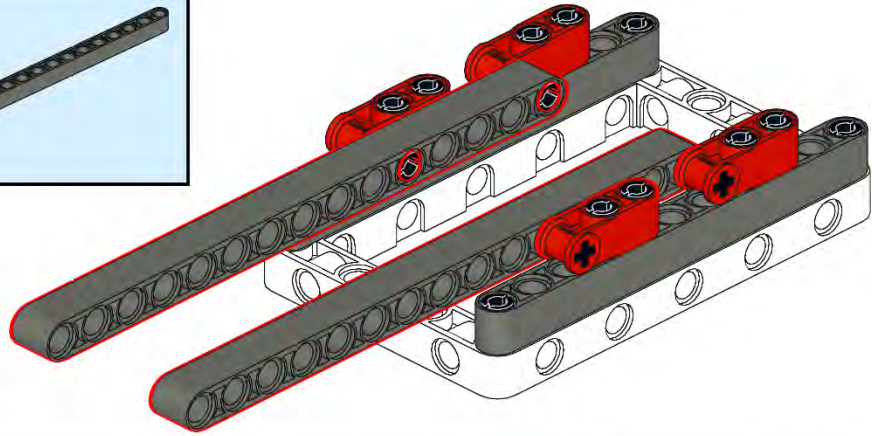
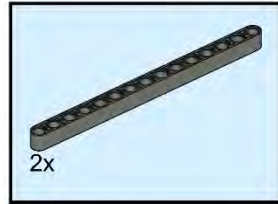
2



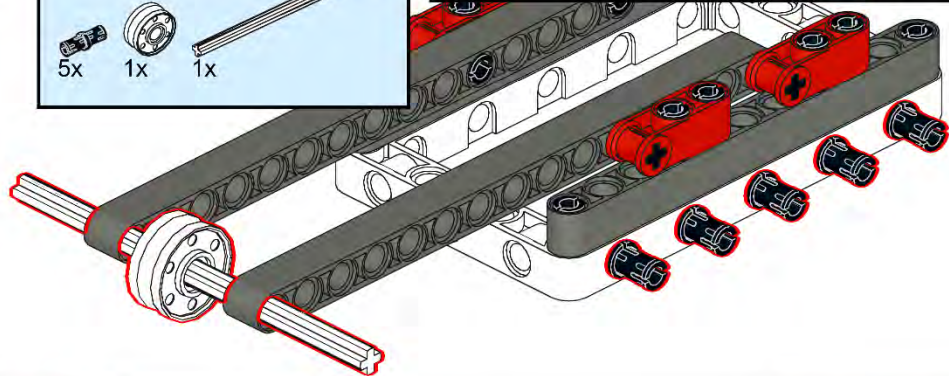
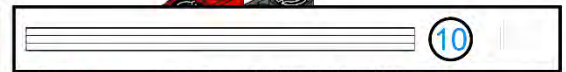
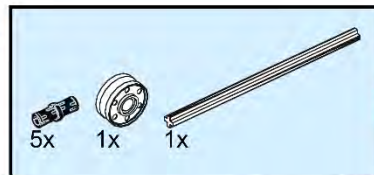
3



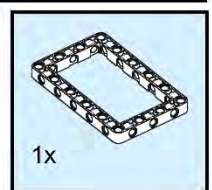
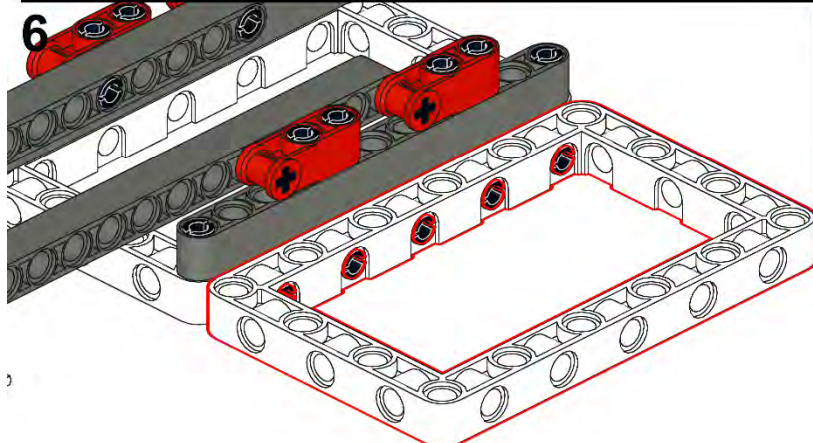
4



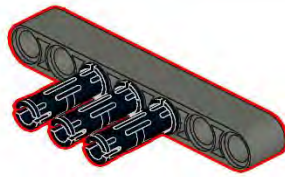
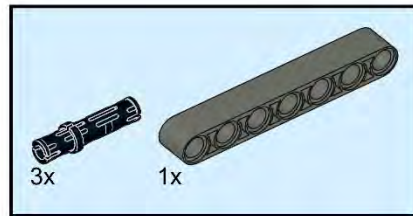
5



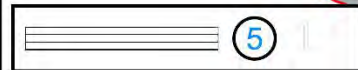
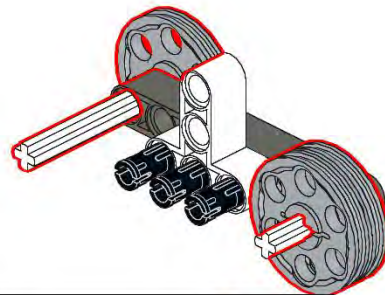
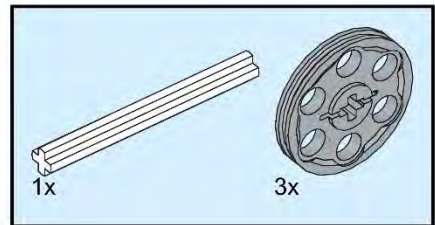
6



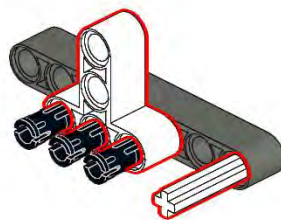
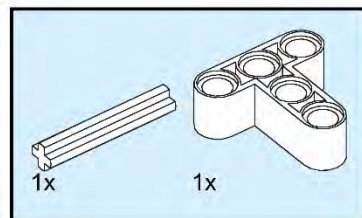
7



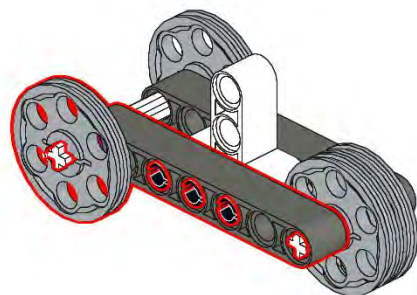
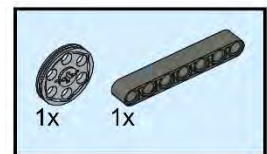
9



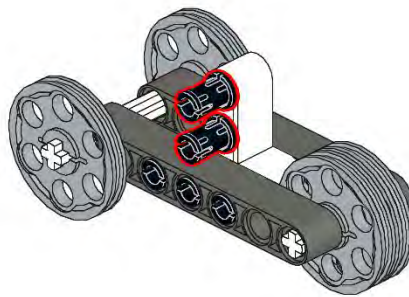
8



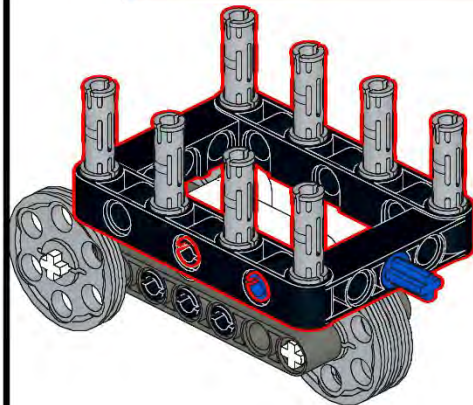
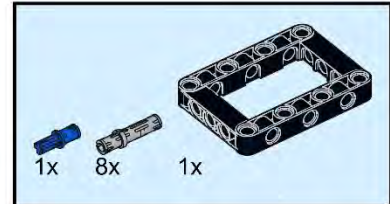
10



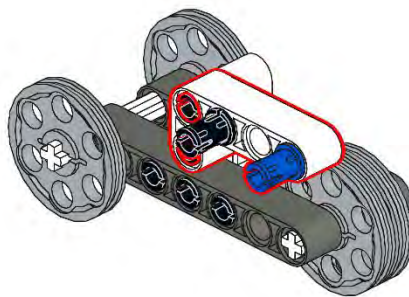
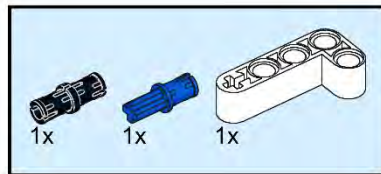
11



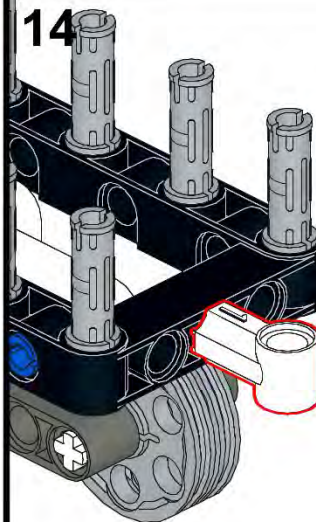
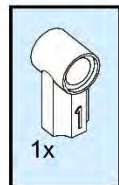
13



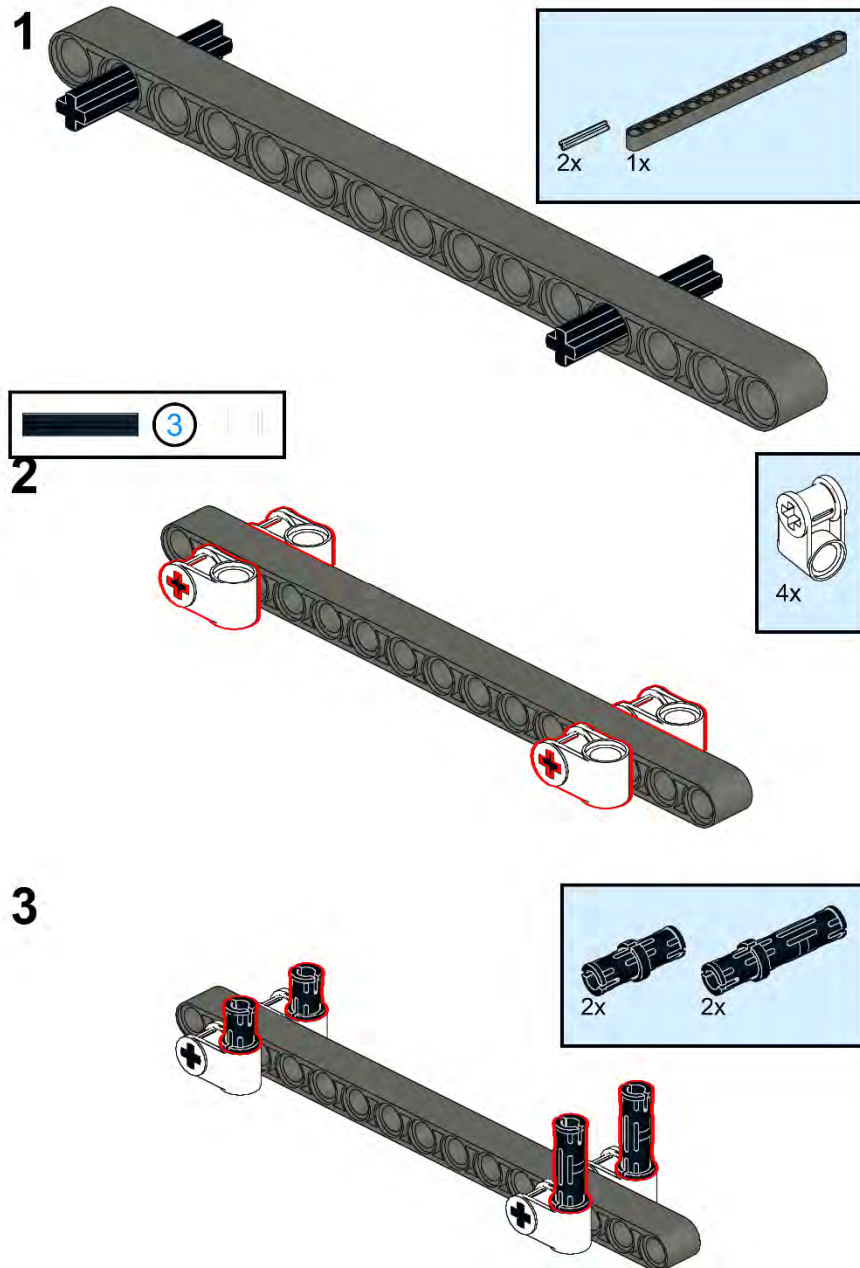
12



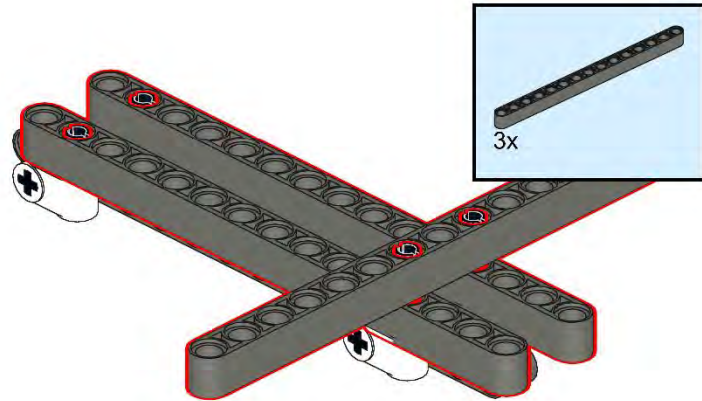
14



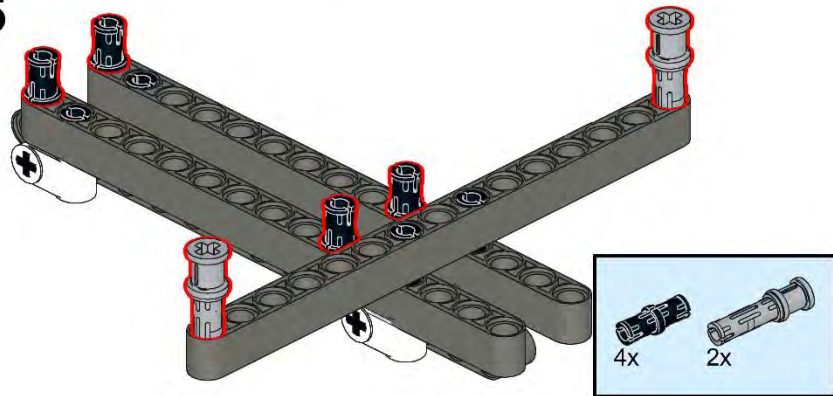
A.6 Anleitung zur Balliste



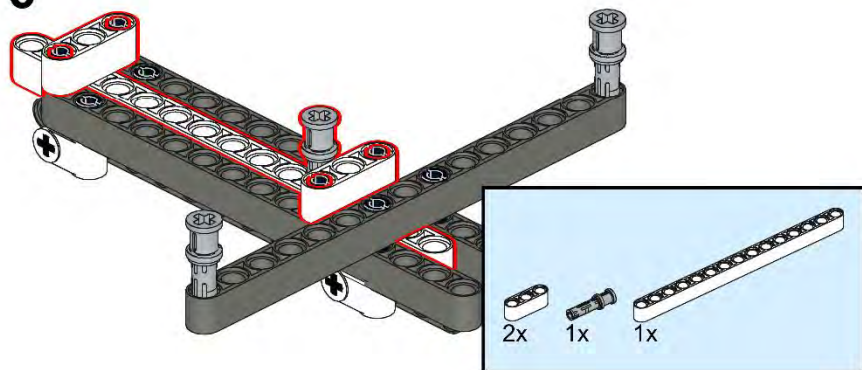
4



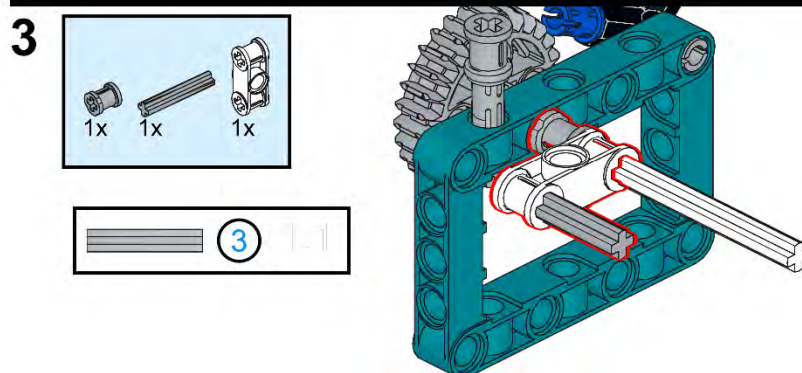
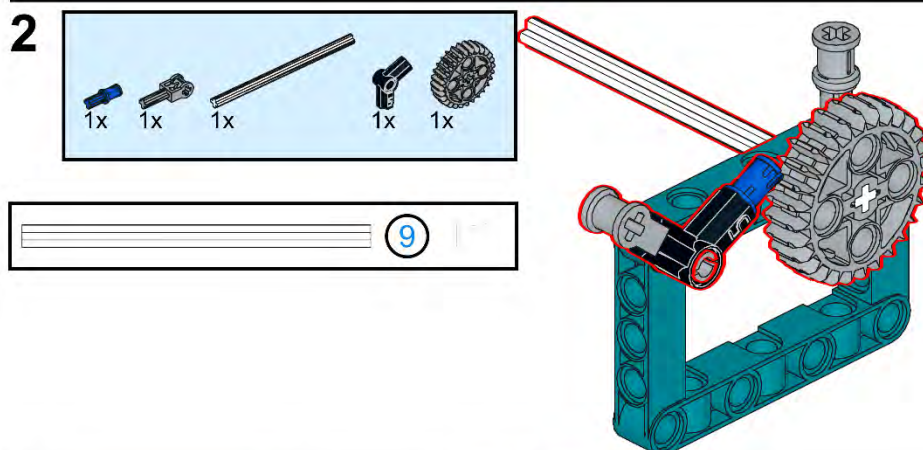
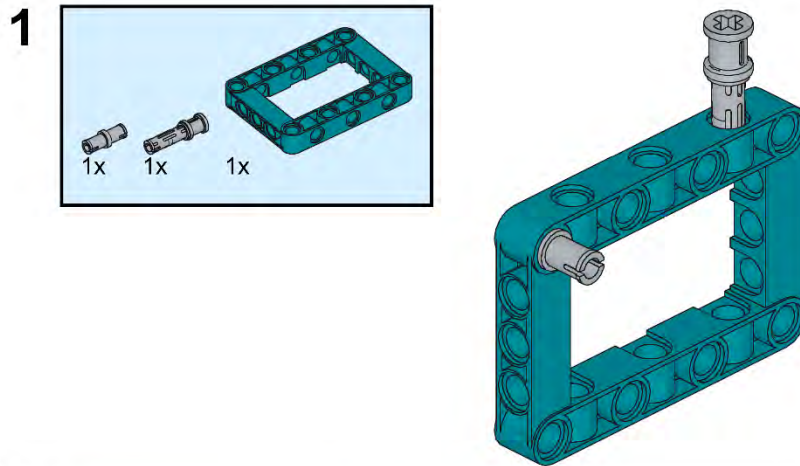
5



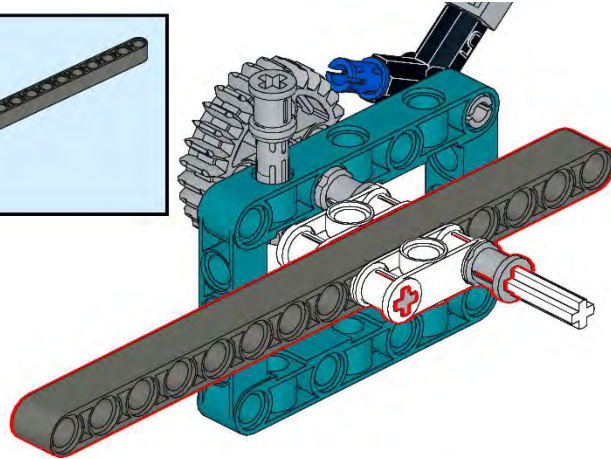
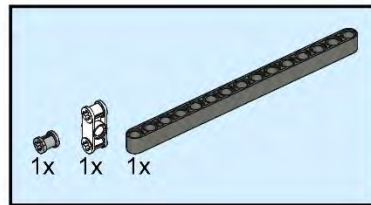
6



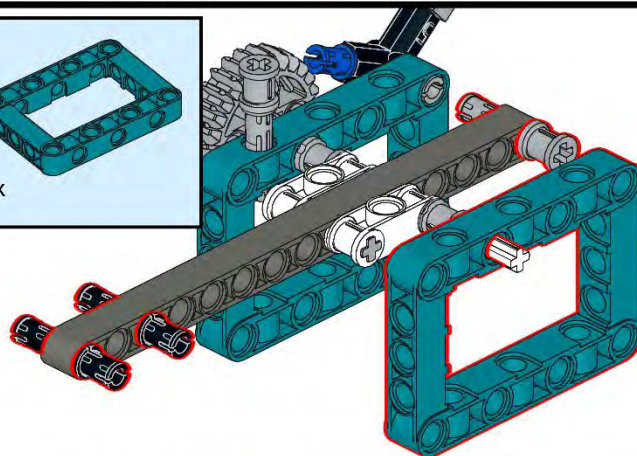
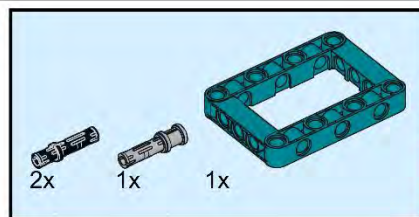
A.7 Anleitung zum Katapult



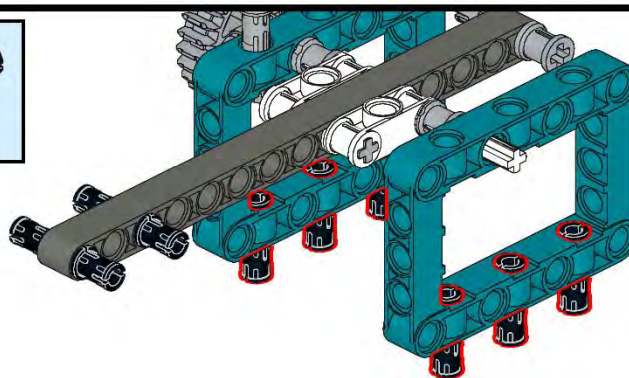
4



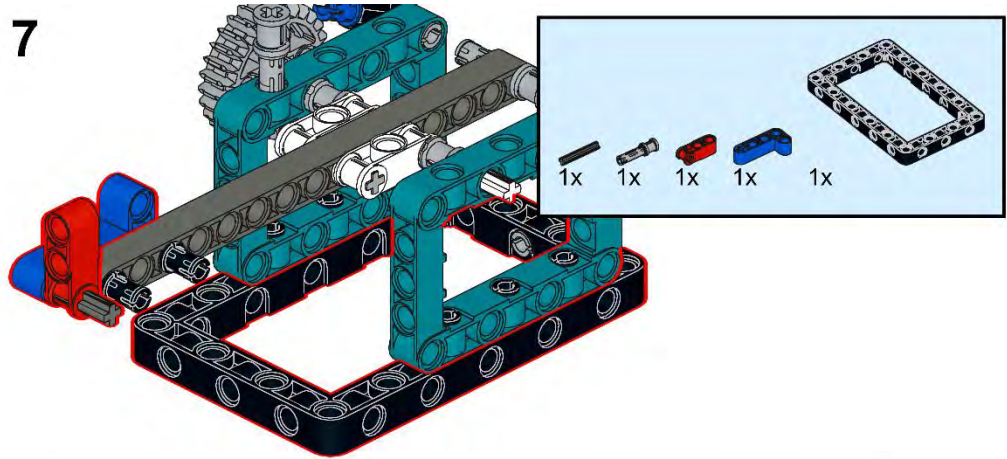
5



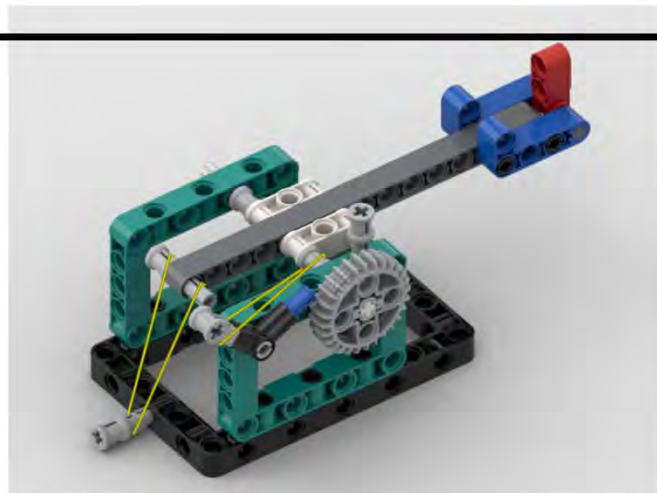
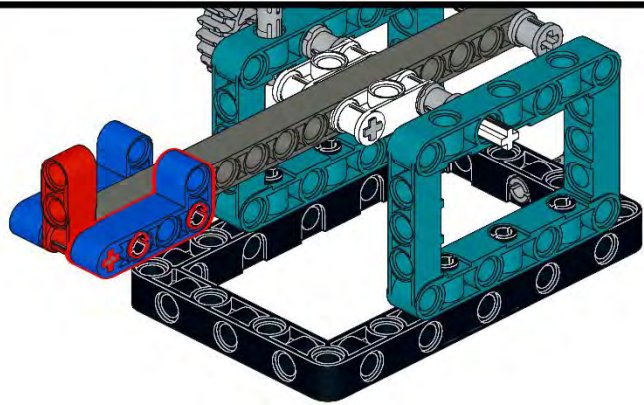
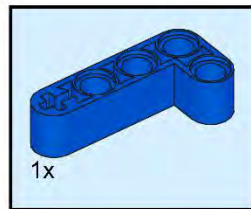
6



7

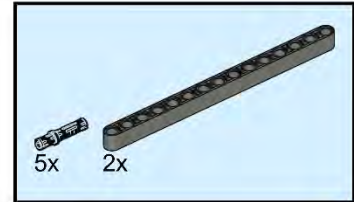
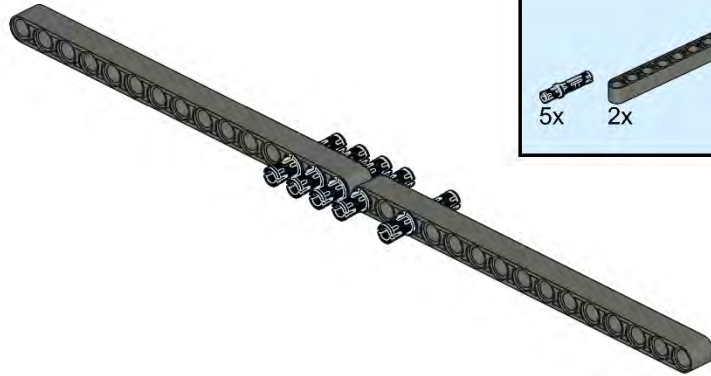


8

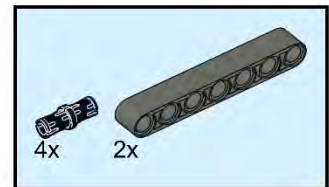
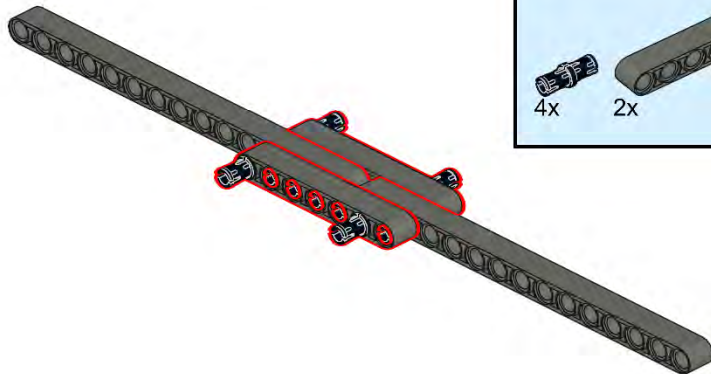


A.8 Anleitung zum Auto mit Rückzugsmotor

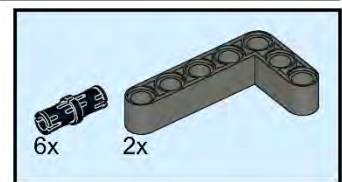
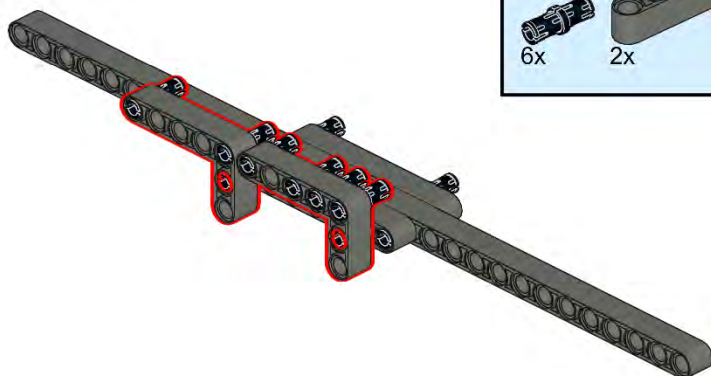
1



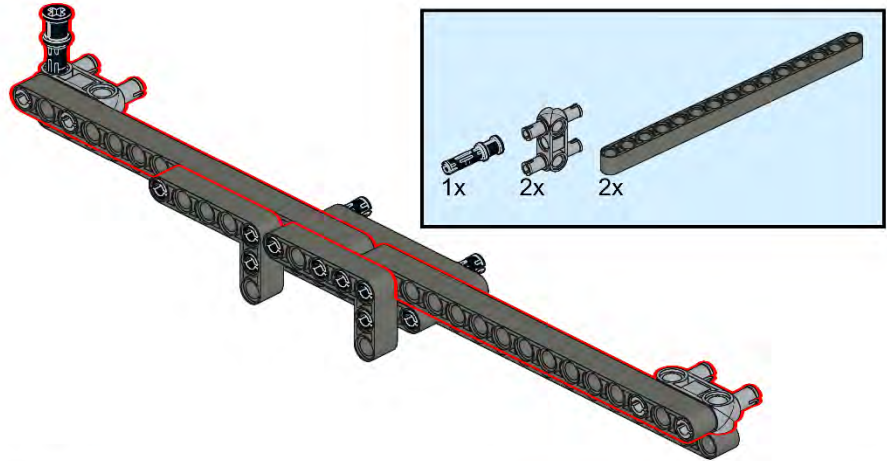
2



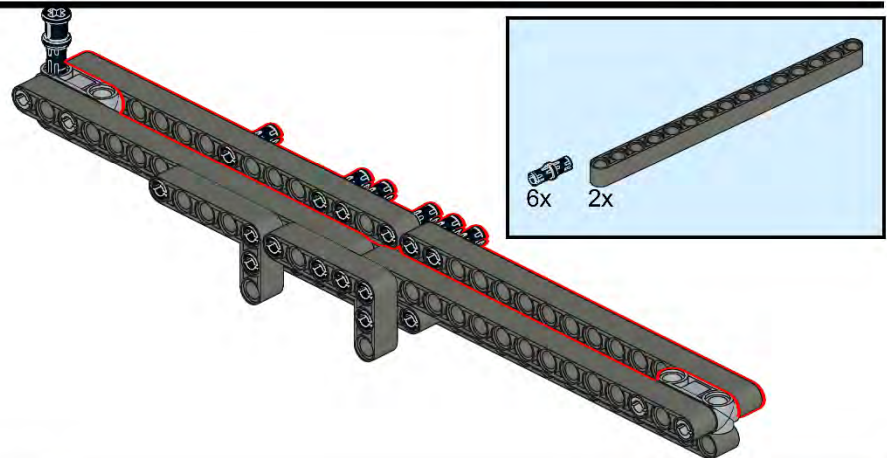
3



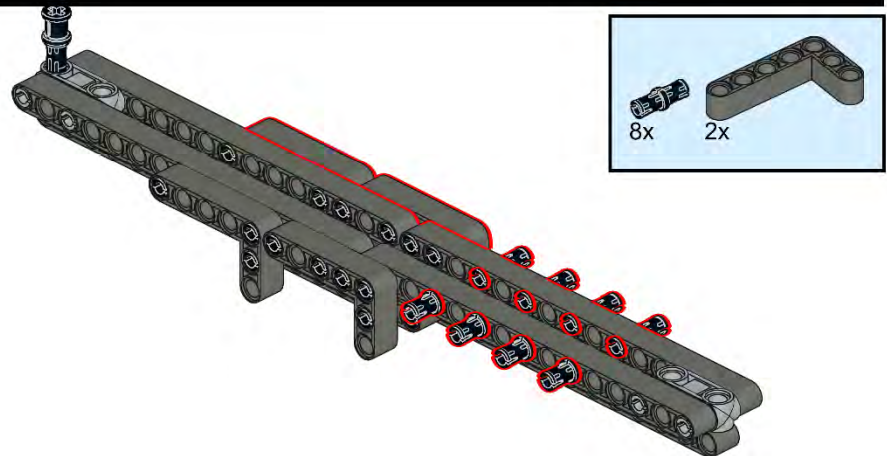
4

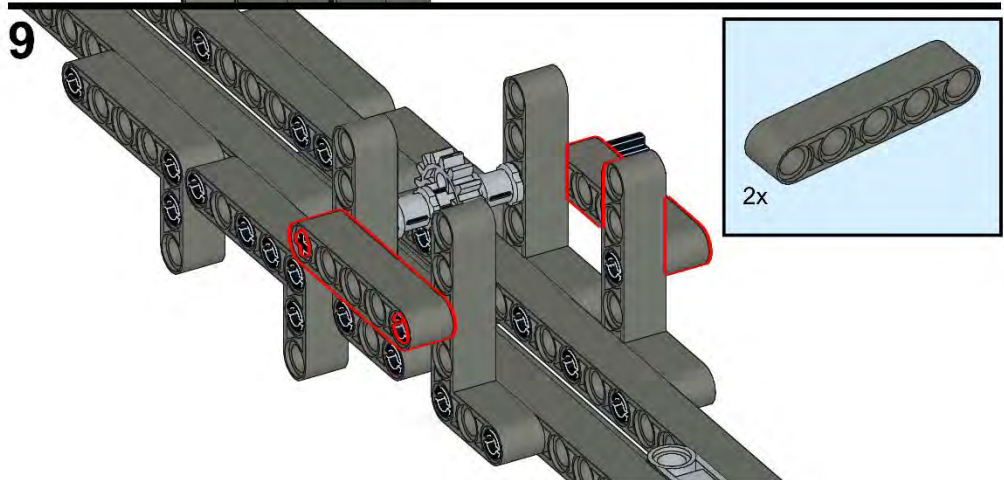
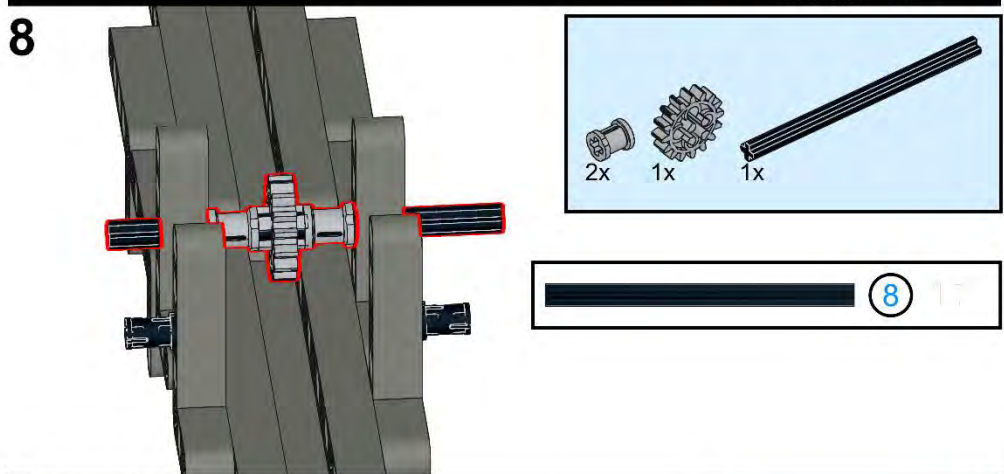
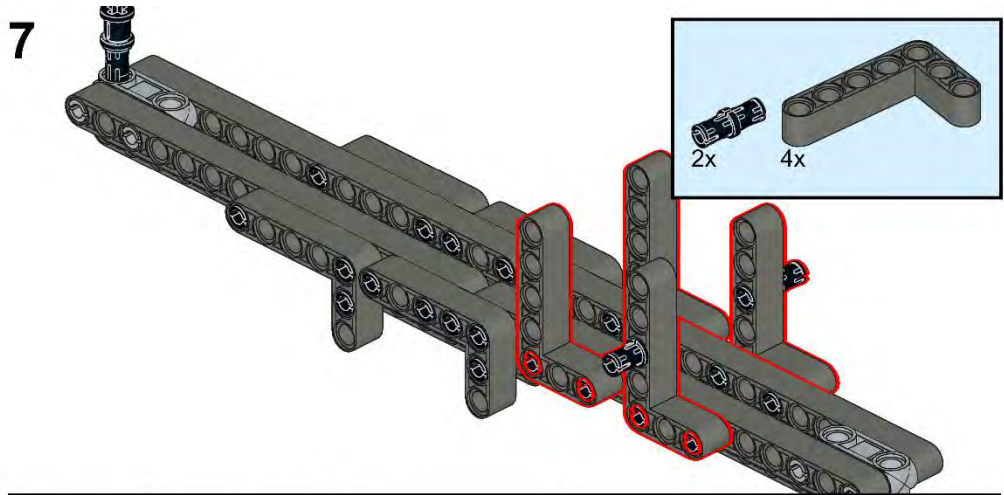


5

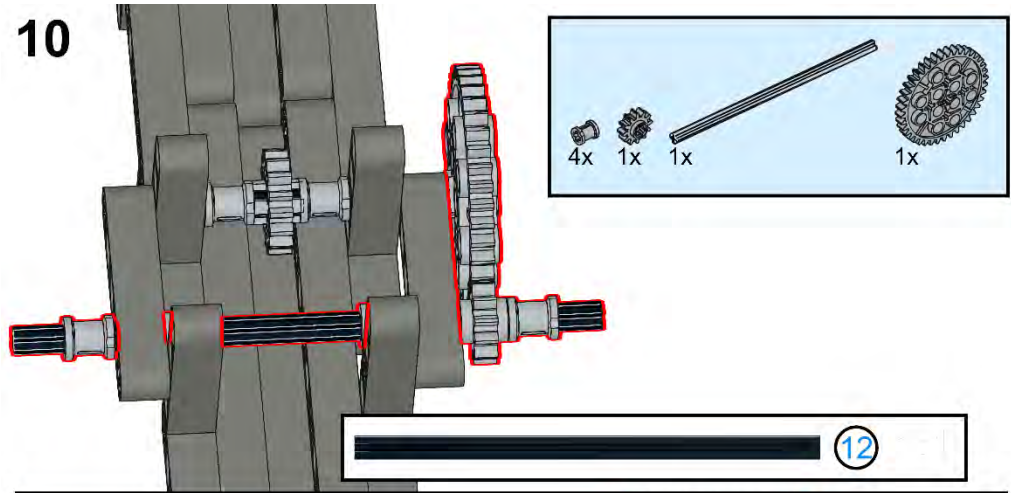


6

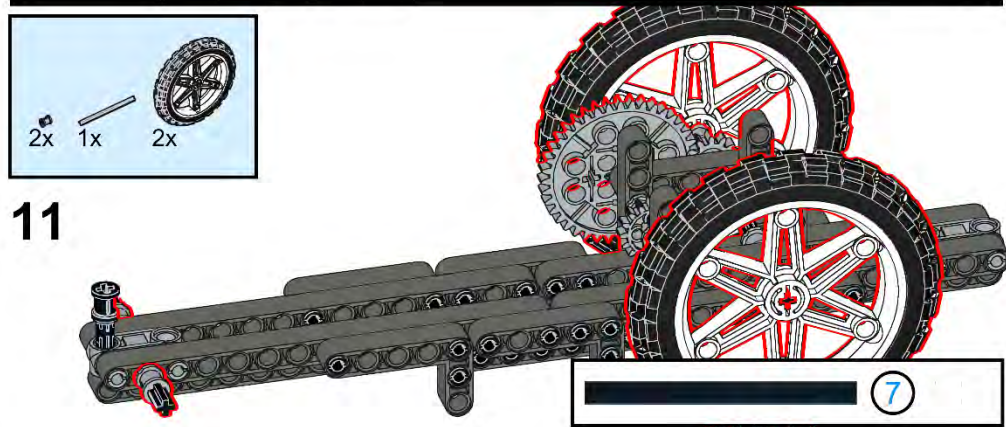




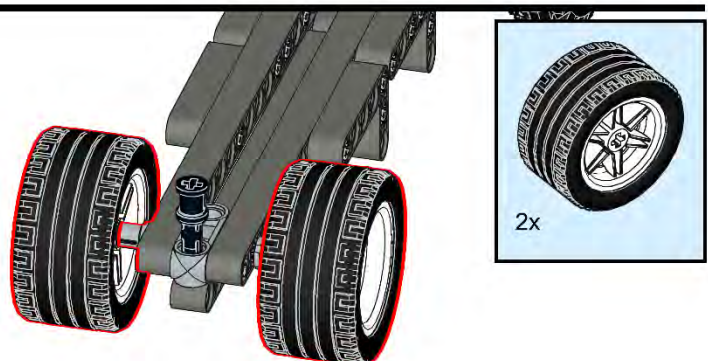
10



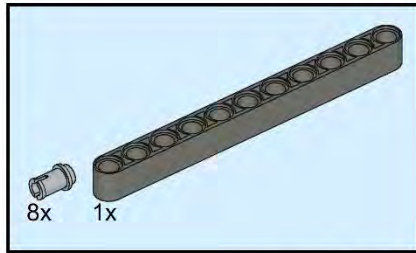
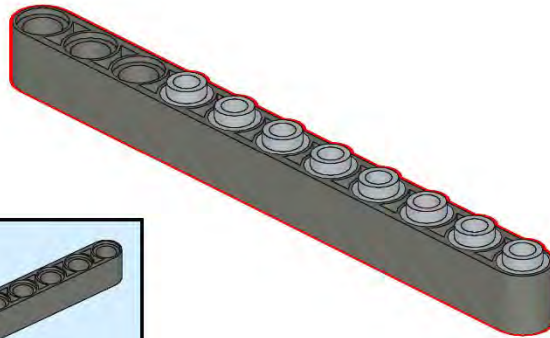
11



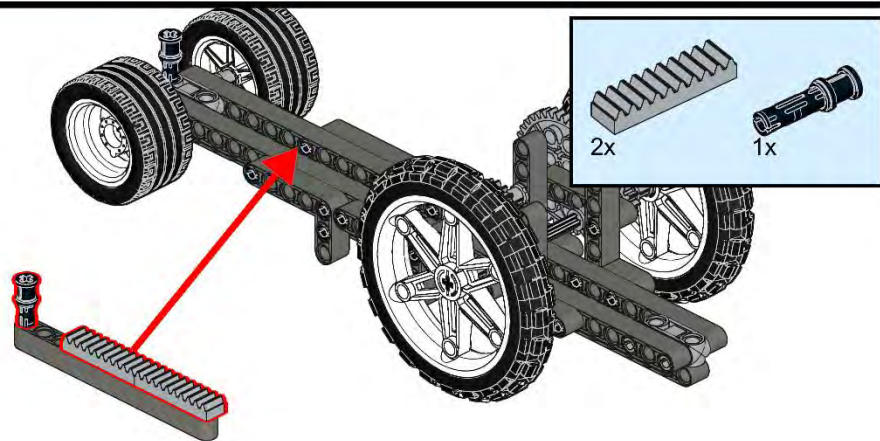
12



13



14



3 gelbe
Gummiringe

