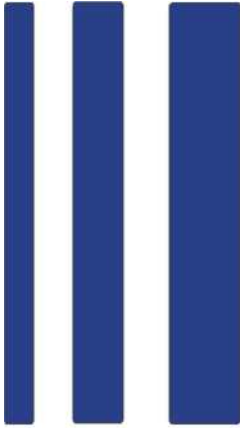


**Christoph Kulgemeyer
Susann Hartmann
Johannes Rethfeld**



Lego Mindstorms im Physikunterricht

-

Vorschläge aus Bereichen der Mittelstufenphysik

Institut für Didaktik der



**Naturwissenschaften
Abt. Physikdidaktik**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Einleitung	iii
1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?	1
1.1 Einführung	1
1.2 Aufgaben und Lösungen	3
1.1 Aufgabenkarte 1	5
1.1 Lösungskarte zu Aufgabe 1	6
1.1 Erwartete Schülerantworten zu Aufgabe 1	6
1.2 Aufgabenkarte 2	7
1.2 Lösungskarte zu Aufgabe 2	7
1.3 Aufgabenkarte 3	8
1.3 Lösungskarte zu Aufgabe 3	8
1.4 Aufgabenkarte 4	9
1.4 Lösungskarte zu Aufgabe 4	9
1.5 Aufgabenkarte 5	10
1.5 Lösungskarte zu Aufgabe 5	10
1.6 Aufgabenkarte 6	11
1.7 Aufgabenkarte 7	12
1.7 Checkliste zu Aufgabe 7	13
1.8 Aufgabenkarte 8	14
1.8 Lösungskarte zu Aufgabe 8	15
1.9 Aufgabenkarte 9	16
1.9 Hilfekarte zu Aufgabe 9	17
1.9 Lösungskarte zu Aufgabe 9	18
1.6 Lösungskarte zu Aufgabe 6	19
1.3 Vertiefender Begleittext	20
1.3.1 Voraussetzungen	20
1.3.2 Theorie	20
1.3.3 Abbildung in die Roboterwelt und mindstormfremdes Material	21
1.3.4 Programmierung und Durchführung	22
1.3.5 Auswertung	25

Inhaltsverzeichnis

2	Ein Abschleppwagen im Einsatz	27
2.1	Einführung	27
2.2	Aufgaben und Lösungen	28
2.1	Begleittext 1	31
2.1	Aufgabenkarte 1	32
2.1	Lösungskarte zu Aufgabe 1	32
2.2	Aufgabenkarte 2	33
2.2	Lösungskarte zu Aufgabe 2	33
2.3	Aufgabenkarte 3	34
2.2	Begleittext 2	35
2.4	Aufgabenkarte 4	36
2.4	Lösungskarte zu Aufgabe 4	37
2.5	Aufgabenkarte 5	38
2.5	Hilfekarte zu Aufgabe 5	39
2.6	Aufgabenkarte 6	40
2.6	Lösungskarte zu Aufgabe 6	40
2.7	Aufgabenkarte 7	41
2.7	Lösungskarte zu Aufgabe 7	41
2.8	Aufgabenkarte 8	42
2.8	Lösungskarte zu Aufgabe 8	43
2.9	Aufgabenkarte 9	44
2.9	Hilfekarte zu Aufgabe 9	45
2.9	Hilfekarte 2 zu Aufgabe 9	46
2.3	Vertiefender Begleittext	47
2.3.1	Voraussetzungen	47
2.3.2	Theorie	47
2.3.3	Abbildung in die Roboterwelt und mindstormfremdes Material	47
2.3.4	Programmierung	49
2.3.5	Durchführung	49
2.3.6	Auswertung	50
2.3.7	Variationsmöglichkeiten	51
	Tabellenverzeichnis	52
	Abbildungsverzeichnis	53
	Index	54

Einleitung

Liebe Kolleginnen und Kollegen!

Die Auswertung der Roberta-Kurzkurse zeigt, dass die Teilnehmer/innen nach dem Besuch von einem Kurs mehr Selbstvertrauen im Bereich Programmierung haben. Allerdings sinkt ihr Selbstvertrauen im Bereich Naturwissenschaften eher, als dass es steigt. Da es in bisher durchgeführten Roberta-Kursen für die Teilnehmer/innen keine Möglichkeiten gab, eigene Kompetenz im Bereich Naturwissenschaft zu erleben, ist diese Tatsache wenig verwunderlich.

Um Kursleiter/innen die Möglichkeit zu geben, auch im Bereich der Naturwissenschaften - hier exemplarisch für den Bereich Physik - tätig zu werden, ist folgende Zusammenstellung von kleineren Experimenten entstanden. Sie beschäftigen sich mit den in der Sekundarstufe I üblicherweise behandelten Themenbereichen Mechanik und Optik. Aufgabenstellungen und Musterlösungen sollen den Einsatz in den Kursen erleichtern.

Einem Themenbereich sind zwei Abschnitte zugeordnet: Zum einen die Aufgabenvorschläge und zum anderen ein Text zur Vertiefung mit theoretischem Hintergrund sowie exemplarischer Auswertung des jeweiligen zentralen Versuches. Dieser ist vor allem als Hintergrundinformation für Kursleiter/innen zu verstehen und so gehalten, dass er auch für Nicht-Physiker/innen verständlich ist.

Die Aufgaben sind in Form von Karten konzipiert, die ausgeschnitten und auf getrennte Aufgaben- und Lösungskartenstapel gelegt werden sollen. Oftmals finden sich

zu einzelnen, schwierigen Punkten auch Hilfekarten. Dabei sollten die Aufgaben chronologisch in der Reihenfolge bearbeitet werden, in der sie abgedruckt sind, denn diese Reihenfolge folgt einem möglichen physikalischen Verstehensprozess.

Für Anregungen, Fragen und Kritik sind wir dankbar.

Wir wünschen viel Spaß bei der Kursgestaltung und -durchführung!

Susann Hartmann

und

Christoph Kulgemeyer

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

Herr Lilienstengel gehört zum Volk der Dämmerung und wohnt im Land der Dämmerung. Man nennt es auch „das Land, das nicht ist,. Jeden Abend nimmt mich Herr Lilienstengel mit ins Land der Dämmerung. Nie werde ich vergessen, wie er mich das erste Mal abholte. (...) In den Zimmerdecken war es schon ganz dunkel. Ich wollte kein Licht haben (...) Stockholm lag in der Dämmerung, in einer ganz weichen, blauen Dämmerung. Es war tatsächlich seltsam: die leeren Straßen und dazu diese geheimnisvolle blaue Dämmerung.
(Lindgren, A. (1978): Märchen. S.34 ff. Hamburg: Oetinger)

Diese Auszüge aus einem Märchen von Astrid Lindgren könnten als Einstieg in einen Themenbereich dienen, in dem Schüler und Schülerinnen Fragen nach „Tag und Nacht“, „hell und dunkel“ oder „Licht und Schatten“ nachgehen. Themenkomplexe dieser Art gehören zum Kern des Optikunterrichts in der Sekundarstufe I und beziehen sich auf Phänomene, die die Alltagserfahrung betreffen.

1.1 Einführung

Durch die Möglichkeit, mit dem Lichtsensor die Lichtintensität zu messen, können

Schüler/innen Fragestellungen wie den folgenden nachgehen:

- Wo ist [wieviel] Licht? Hört Licht irgendwo auf? Kannst du Licht sehen? Ist Licht auch hinter einer Ecke? Was ist Dämmerung? Wo beginnt Dämmerung?
- Wieviel Licht ist für dein Auge gut? Wann blendet Licht? Wo sind die Farben, wenn es dämmt?
- Wie ist die Abhängigkeit von Lichtintensität und Entfernung von einer Lichtquelle?

Die ersten Fragen können qualitativ beantwortet werden (Anregungen und Musterlösungen finden sich unter 1.2 (S. 3)). Die dem zweiten Punkt zugeordneten Fragen reichen stark in den Bereich Biologie, da hier das menschliche Auge und seine Empfindlichkeiten inhaltlich zentrale Gegenstände sind. Die unter dem letzten Punkt angeführte Frage nach der Abhängigkeit der Lichtintensität von der Entfernung zu einer Lichtquelle jedoch kann sowohl qualitativ als auch quantitativ gelöst werden. Qualitativ wäre festzustellen, dass die Lichtintensität mit zunehmenden Abstand von der Lichtquelle sinkt, quantitativ kann die umgekehrt quadratische Abhängigkeit $I \sim \frac{1}{x^2}$ gefunden werden. Für Roberta-Kurse, die physikalische Anteile aufnehmen wollen, ohne diese zu vertiefen, ist ein qualitatives Vorgehen (Staunen, Fragen formulieren, vorläufige Hypothesen bilden, mit

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

dem Roboter Versuche zur Überprüfung der Hypothesen planen und durchführen, erste qualitative Antworten formulieren) zu empfehlen. Wer darüber hinaus die festgestellten Abhängigkeiten quantitativ experimentell herleiten oder überprüfen möchte, dringt tiefer in die Physik ein und benötigt dazu nicht nur mehr Zeit, sondern auch Schüler und Schülerinnen, die für quantitative Fragestellungen interessiert werden können.

Die Erfassung der einfallenden Lichtintensität in Abhängigkeit von der Entfernung zu einer Lichtquelle gemäß der in der Liste zuletzt angeführten Frage ist im Begleittext (S. 20) etwas detaillierter ausgeführt. Dies geschieht nicht, weil wir glauben, dass diese Fragestellung für Roberta-Kurse am besten geeignet ist, sondern in der Überzeugung, dass die übrigen Fragestellungen auch allein mit Hilfe der Aufgaben und Musterlösungen (Vgl. S.3) einsetzbar sind.

Die nun folgenden Aufgabenkarten gliedern sich in zwei Teile. Während die Aufgaben 1 bis 5 noch qualitative Schwerpunkte legen, ist ab Aufgabe 6 der Sprung zu einer quantitativen Behandlung der Abhängigkeit der Lichtintensität von der Strecke vorgesehen. Um diese Aufgaben (Aufgaben 6-9) zu behandeln, sollten die Schüler/innen im Umgang mit Diagrammen möglichst geübt sein und quadratische Funktionen kennen. Mittels Hilfekarten wird hier jedoch verstärkt Hilfestellung gegeben. Es ist auf jeden Fall möglich, mit Schülern und Schülerinnen, die nicht soweit in die Physik eintauchen möchten, nach Aufgabe 5 einen sinnvollen Schlusspunkt zu setzen. Für das Bearbeiten der Aufgaben sollten zwei Schulstunden à 45 Minuten veranschlagt werden.

1.2 Aufgaben und Lösungen

Die Aufgabenkarten sind so normiert, dass sie entweder eine ganze Seite oder eine halbe Seite Platz einnehmen. Somit ist es möglich, sie als Kopiervorlage zu verwenden und mit einer Papierschneidemaschine zuzuschneiden. Sie sind chronologisch abgedruckt.

Schnellübersicht

Für jeden Arbeitsplatz wird über den Mindestmalkasten hinaus benötigt (siehe auch Kapitel 1.3.3, S.21):

Anzahl	Art	Vorhanden?
1	Taschenlampe, Glühwendel mit höchstens vier 1,5 V Batterien	
2 m	Tesakrepp	
1	Lineal / Zollstock (min. 30 cm)	
1	Stift	

Dauer: ca. 90 Minuten.

Vorbereitungen: Für jeden Arbeitsplatz ein Satz Aufgabenkarten sowie die Bereitstellung von Roverbot, Computer und Lichtsensor (Siehe auch 1.3.3, S.21).

Arbeitsplatz: 2-3 Schüler an zwei Tischen, auf jeden Fall ca. zwei Meter Platz.

1.1 Aufgabe

Kathrin sagt: „Wenn ein Raum hell ist, ist überall gleichviel Licht.“

Lina ist damit nicht einverstanden: „Nein, es gibt auf jeden Fall Stellen im Raum, wo mehr Licht ist, als an anderen!“

Kathrin erwidert: „Also ich stelle mir das so vor, wie ein Aquarium - wenn ich Wasser reinlasse, füllt es doch alles aus. Wenn ich in einen Raum Licht reinlasse, wieso sollte es dann anders sein?“

Was meinst du? Ist in dem Raum, in dem du bist, an allen Stellen gleichviel Licht? Wenn ja, warum? Wenn nein, warum nicht? Notiere deine Gedanken und diskutiere sie mit deiner Partnerin oder Deinem Partner!

1.1 Lösungskarte

Licht verteilt sich **nicht** wie Wasser im Raum. Nahe bei einer Lampe ist immer mehr Licht als weit von ihr entfernt. Stellen, an denen weniger Licht ankommt, nennt man auch Schatten. Würde durch das Fenster eines Raumes Wasser und nicht Licht reinkommen, wäre nach kurzer Zeit unter einem Tisch genausoviel Wasser wie neben oder über dem Tisch. Licht befindet sich auch ständig in Bewegung, während Wasser ruhen kann.

1.1 Erwartete Schülerantworten

- Wo Schatten ist, ist kein Licht.
- Es gibt nur hell oder dunkel.
- Es gibt helle und dunkle Flächen, das hängt von ihrer Farbe ab.
- es gibt Bereiche mit viel, etwas, ..., gar keinem Licht (Graustufen).

1.2 Aufgabe

Wie kannst du Deine Gedanken experimentell überprüfen?

1.2 Lösungskarte

Beobachtung mit meinem Auge: Ich betrachte Licht / Schatten / Halbschatten im Raum. Licht ist also nicht überall gleichmäßig verteilt.

Beobachtung mit dem Lichtsensor des Roverbot: Ich kann deutliche Unterschiede zwischen Schatten und Licht mit meinem Sensor messen. Licht ist also nicht überall gleichmäßig verteilt.

Resultat: Licht ist im Raum nicht überall gleichmäßig verteilt; es gibt Orte mit mehr oder weniger Licht. Dies können wir mit bloßem Auge oder mit dem Lichtsensor des Roverbot feststellen.

1.3 Aufgabe

Betrachte vier Orte im Raum und schätze, wieviel Licht dort ankommt. Notiere Deine Schätzungen zunächst verdeckt und vergleiche sie dann mit denen Deines Partners oder Deiner Partnerin!

Tipp: Nimm an, am hellsten Ort sei 100% Licht - wieviel ist an den anderen Orten?

Stimmten eure Werte überein? Kannst du die Menge von Licht (die Lichtintensität), die an einem Ort ankommt, anders als mit Deinem Augen feststellen?

1.3 Lösungskarte

Wahrscheinlich stimmten eure geschätzten Werte nicht exakt überein. Möglicherweise lagen sie aber nahe beieinander. Das Auge kann nämlich auch feine Unterschiede zwischen einzelnen „Lichtzonen“ erkennen. Auch mit Geräten können wir unterschiedliche Lichtintensitäten feststellen. Ein dazu geeignetes Gerät ist zum Beispiel der Lichtsensor eures Roverbots. Dieser Lichtsensor kann als 100% nicht den hellsten Ort im Raum wählen. Er ist so eingestellt, dass 100% einer Lichtintensität von 760 Lux entsprechen.

1.4 Aufgabe

Nimm nun deinen Roverbot und lass dir die Werte anzeigen, die sein Lichtsensor misst.

Verändert sich die Anzeige, wenn du Dich einer Lichtquelle näherst? Beschreibe diese Veränderungen!

1.4 Lösungskarte

Je näher ich an einer Lichtquelle bin, desto mehr Licht messe ich dort.

1.5 Aufgabe

Nimm deinen Roverbot und richte ihn in ungefähr zwei Schritten Entfernung auf eine Lampe, am besten eine Taschenlampe. Dann gehe von dieser Lampe weg und beobachte die Veränderungen auf der Anzeige des Lichtsensors. Verändert sich die Anzeige mit jedem Schritt gleich stark?

1.5 Lösungskarte

Wenn ich mich von einer Lichtquelle entferne, nimmt die Intensität des Lichts schneller ab, als die Entfernung zu.

1.6 Aufgabe

Eines Abends bekommt ihr Besuch von Herrn Lilienstengel aus dem Land der Dämmerung, der euch von einem sagenumwobenen Schatz erzählt. Dieser befindet sich inmitten eines dunklen Waldes und wurde von einem tückischen Baumeister mit Fallen zum Schutze versehen. Nachdem ihr ihn mühsam überredet habt, gibt er euch auch eine Schatzkarte.

„Seid gewarnt!“, sagt er dabei sorgenvoll. „Ich bedauere schon, dass ich euch überhaupt davon erzählt habe, denn schon viele Menschen sind bei der Suche verschollen. Der Schatz ist unter einer Falltür verborgen, die auf einem geraden Weg in der Mitte des Waldes liegt. Sie verschlingt denjenigen, der auf sie tritt, doch einen Schritt vor ihr müsst ihr dreimal auf den Boden klopfen, dann gibt sie alles frei, was sie verschluckt hat - auch den Schatz!“

Ihr nehmt eine Taschenlampe mit, da der Wald so dunkel sein soll. Außerdem habt ihr euren Roverbot im Gepäck. Bald schon habt ihr den Weg gefunden und beschließt euch zu trennen - einer geht nordwärts, der andere südwärts hinunter. Nach einer sehr kurzen Wegstrecke siehst du nur noch den Schein der Taschenlampe deiner Freundin / deines Freundes und sonst nichts mehr. Dein Blick fällt auf die Anzeige deines Roverbots. Der Lichtsensor zeigt genau 10% Licht an, als plötzlich ein Schrei in der Nähe ertönt und das Licht der Taschenlampe verschwindet. Dein Freund / deine Freundin ist in die Fallgrube gefallen! Dir fallen die Worte Herrn Lilienstengels wieder ein: Du musst die Falltür finden und davor dreimal auf den Boden klopfen. Du erinnerst dich, dass der Roverbot zu Hause einen Meter vor der Taschenlampe 90% Licht anzeigte und eben, als der Schein der Taschenlampe verschwand, 10%.

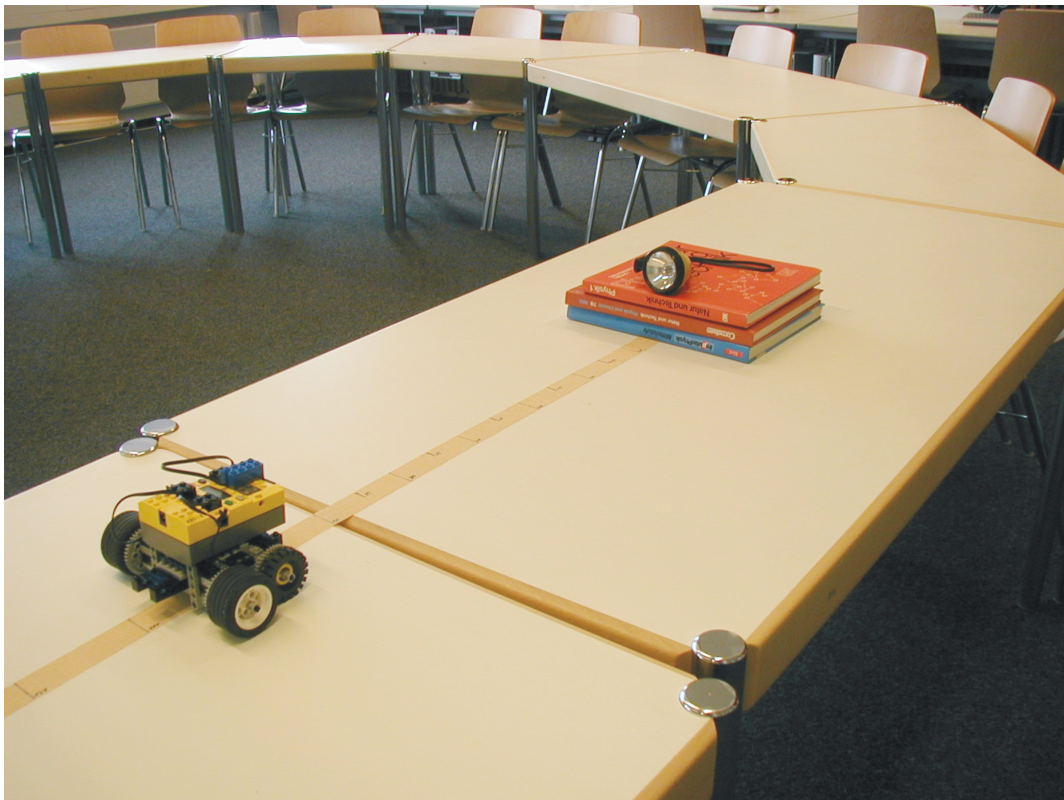
Wie kannst du herausfinden, wo sich die Falltür befindet? Du weißt, dass einer deiner Schritte einen halben Meter lang ist! Wieviele Schritte musst du gehen, um deinen Freund oder deine Freundin zu retten?

Bearbeite erst die nächsten Aufgaben um herauszufinden, wie sich die Lichtintensität mit dem Abstand von einer Lichtquelle (z.B. einer Taschenlampe) verändert. Erst wenn du das weißt, kannst du die Lösung finden!

1.7 Aufgabe

Wie verändert sich die Lichtintensität, wenn du dich zu einer Lichtquelle hin bewegst? Schreibe ein Programm für deinen Roverbot, um ihn als Messinstrument für die Zunahme der Lichtintensität zu benutzen! Was muss er dazu können?

Wenn Du nicht weiter kommst, kannst Du Dir auch eine Checkliste holen, auf der steht, was der Roverbot alles können muss. Etwa so sollte der Versuchsaufbau aussehen:



1.7 Checkliste

Mein Roverbot kann...

... auf die Lichtquelle zu fahren. ☐

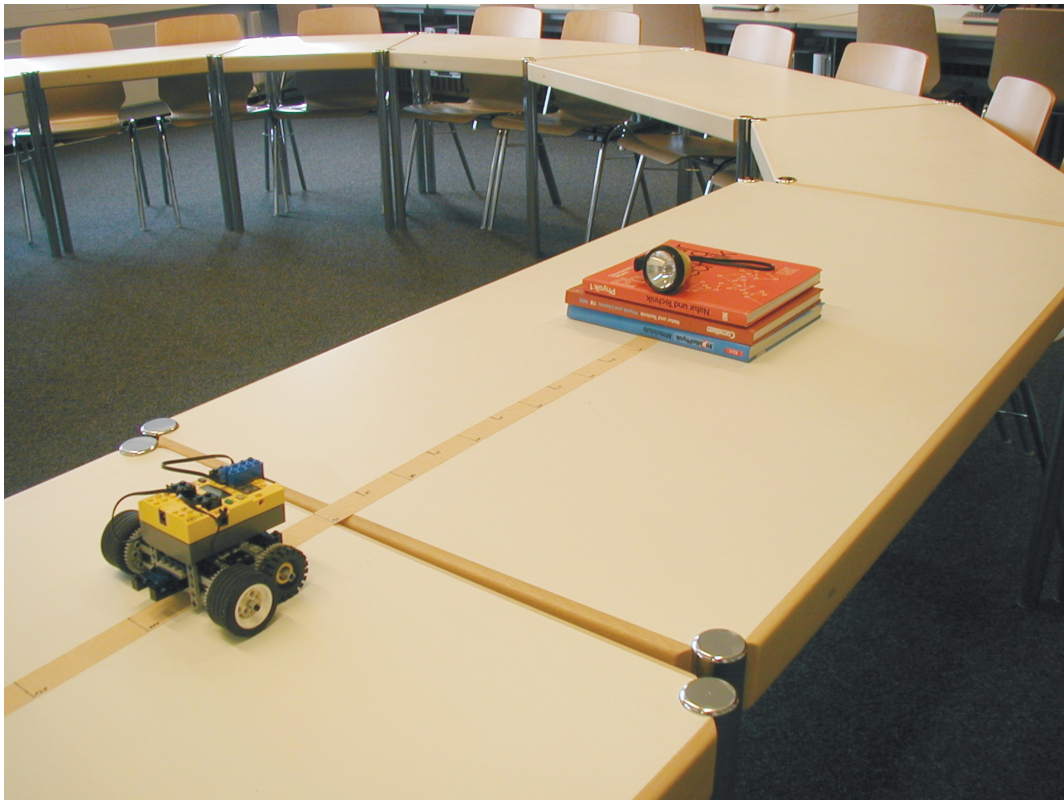
... bei einer Veränderung von ca. 5% der Skala des Lichtsensors anhalten. Stell den ersten Wert fest, indem du den Roverbot an den Beginn der Messtrecke in ca. 180cm Entfernung von der Lampe stellst. Dort lässt du dir über die „View-Taste“ den Wert anzeigen, den der Lichtsensor gerade misst. Das ist auch der erste Wert in deinem Programm. ☐

... nach mindestens fünfmal Anhalten mit einer Tonfolge das Programm beenden. ☐

1.8 Aufgabe

Nimm nun eine Messreihe mit mindestens fünf Wertepaaren auf. Jedes Paar muss die Lichtintensität und die Entfernung von der Lichtquelle enthalten. Was fällt dir auf?

Vorschlag: Klebe dazu einen Klebestreifen von ca. 180 cm Länge auf den Tisch, so dass er auf die Lichtquelle zuläuft. Lass dann das Programm ablaufen und markiere die Stellen, an der der Roverbot anhält, auf dem Klebestreifen.



Tipp: Der Roverbot fährt schief. Versuche ihn auf dem Klebestreifen fahren zu lassen und korrigiere seine Bahn mit dem Finger. Achte außerdem darauf, dass der Lichtkegel immer genau auf den Lichtsensor leuchtet! Das geht am einfachsten, indem du den Roverbot in ca. 180 cm Entfernung zur Lichtquelle aufstellst und dann den Lichtkegel auf ihn ausrichtest.

1.8 Lösungskarte

Die Markierungen auf dem Klebestreifen liegen eindeutig nicht in demselben Abstand zueinander; der Abstand wird immer kürzer!

1.9 Aufgabe

1. Miss zu jedem Punkt auf dem Klebestreifen die Entfernung von der Lichtquelle und trage sie in eine Tabelle zusammen mit den Werten für die Veränderung der Lichtintensität (der Buchstabe I steht für das Wort Lichtintensität) seit dem Startwert ein. **Miss die Entfernung eines Punktes immer von der Lampe aus.**
2. Zeichne ein Diagramm, indem du auf der x-Achse die Werte für die Lichtintensitätsänderung seit Beginn des Programms aufträgst und auf der y-Achse die für die Entfernung
3. Kannst du einen Zusammenhang erkennen?
4. Wie verändert sich die Strecke in Abhängigkeit von der Lichtintensität?
5. Kannst du deine Beobachtungen in einer Gleichung ausdrücken?

Nimm dir Zeit, deine Gedanken und Beobachtungen zu notieren und mit deinem Partner oder deiner Partnerin zu diskutieren. Vergleicht dann mit der Lösungskarte.

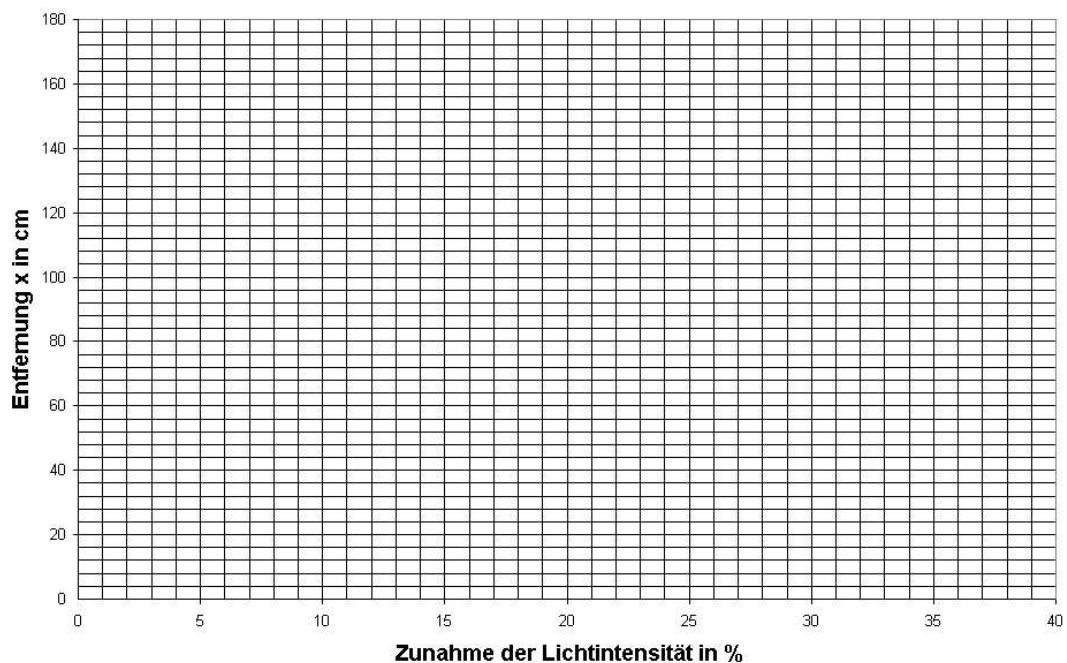
Auf der Hilfekarte findest du leere Beispiele für die Tabelle und das Diagramm, die du ausfüllen kannst!

1.9 Hilfekarte

Ein Beispiel für die Tabelle, das ihr benutzen könnt:

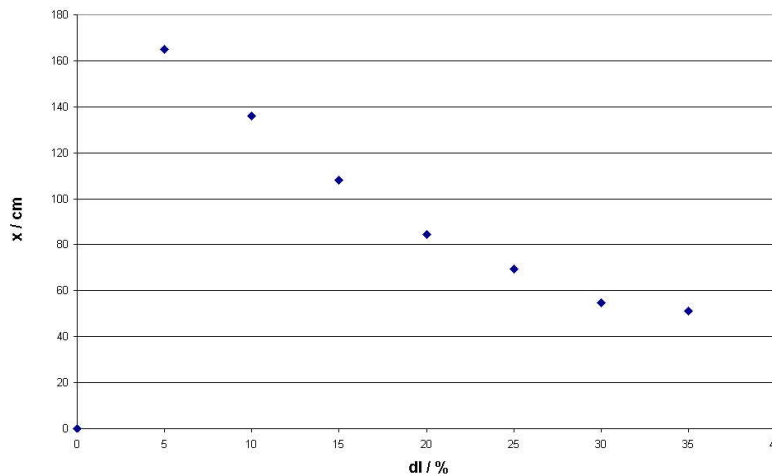
Zunahme der Lichtintensität in %	Entfernung x in cm
5	
10	
15	
20	
25	
30	
35	

Ebenso für das Diagramm:



1.9 Lösungskarte

Bereits auf dem Klebestreifen konntest du sehen, dass die Markierungen nicht in gleichem Abstand zueinander lagen. Auch im Diagramm siehst du, dass die Lichtintensität nahe bei der Lichtquelle schneller zunimmt, als die Entfernung abnimmt.



Mathematisch sehr geübte Menschen sehen an dem Kurvenverlauf, dass es sich um einen quadratischen Zusammenhang handelt. Das bedeutet: In dem Maß, in dem die Lichtintensität größer wird, nimmt der quadrierte Wert der Entfernung ab. Man kann auch sagen: Die Lichtintensität ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes.

In einer Gleichung heißt das: $I \sim \frac{1}{x^2}$.

Weil Lampen unterschiedliche Glühbirnen und damit unterschiedliche Leistungen haben, ist noch ein weiterer Wert (wir nennen ihn die Proportionalitätskonstante k) in die Gleichung einzufügen. Dieser Wert bleibt für ein und dieselbe Lampe immer gleich. In der Sprache der Mathematik kann das Proportionalitätszeichen „ $\sim$ “ nämlich durch ein Gleichheitszeichen ersetzt werden, wenn eine Konstante k hinzugefügt wird. Wenn diese dann festgelegt wird, ist die Gleichung genau bestimmt. Unsere Gleichung heißt nun: $I = k \cdot \frac{1}{x^2}$.

Jetzt hast du alles herausgefunden, was du wissen musst, um deinen Freund / deine Freundin zu retten!

1.6 Lösungskarte

Du hast also herausgefunden, wie der Zusammenhang zwischen Entfernung und Lichtintensität ist. Herzlichen Glückwunsch! Jetzt kannst du berechnen, wo sich die Falltür befindet und deinen Freund / deine Freundin retten! Zunächst weißt du: Einen Meter vor der Taschenlampe zeigte der Roverbot 90% an. Also $I = 90 \%$ und $x = 1 \text{ m}$. Auch die Gleichung $I = k \cdot \frac{1}{x^2}$ kennst du. Setzt du nun die Werte ein, so ergibt sich:

$$90 \% = k \cdot \frac{1}{(1 \text{ m})^2}$$

Jetzt musst du den Wert für k berechnen. Dazu stellst du die Gleichung so um, dass k allein auf der linken Seite steht. Du erhältst:

$$k = 90 \% \cdot (1 \text{ m})^2 = 90 \% \text{m}^2$$

Als die Falltür zuklappte, zeigte der Roverbot nur noch $I = 10 \%$ an! Für k hast du den Wert $k = 90 \% \text{m}^2$ ausgerechnet. Wenn du alle Werte in die Gleichung einsetzt und dann die Gleichung so umstellst, dass x auf der linken Seite steht, erhältst du die Strecke:

$$\begin{aligned} 10 \% &= 90 \% \text{m}^2 \cdot \frac{1}{x^2} \Rightarrow \\ x^2 &= \frac{90 \% \text{m}^2}{10 \%} \Rightarrow \\ x &= \sqrt{\frac{90 \% \text{m}^2}{10 \%}} = \sqrt{9 \text{ m}^2} = 3 \text{ m} \end{aligned}$$

Du bist also nur 3 m von deinem Freund / deiner Freundin entfernt! Da du mit jedem Schritt einen halben Meter zurücklegst, musst du also sechs Schritte bis zur Falltür gehen. Doch vergiss nicht, einen Schritt vorher dreimal auf den Boden zu klopfen! Deinen Freund / deine Freundin retten kannst du also nur, wenn du fünf Schritte gehst und dann dreimal auf den Boden klopfst.

1.3 Vertiefender Begleittext

Dieser kurze Abschnitt soll die Schnellübersicht ergänzen und Hintergrundinformationen für den Kursleiter liefern. Darüber hinaus wird der zentrale Versuch mit den Möglichkeiten der Lego-Mindstormkästen einmal explizit ausgewertet.

1.3.1 Voraussetzungen

Ausgang für den folgenden Versuch war die Frage, ob es möglich ist, den „Roverbot“ zur Untersuchung eines einfachen physikalischen Phänomens zu nutzen.

Da der „Roverbot“ einen Lichtsensor besitzt, liegt die Möglichkeit, ihn für eine Messung der Lichtintensität zu nutzen, auf der Hand. Geprüft werden soll dabei jedoch, ob er in ausreichendem Maße genau arbeitet, um den theoretischen Zusammenhang $I_{\text{Licht}} \sim \frac{1}{x^2}$ wiederzufinden.

1.3.2 Theorie

Bei der gemessenen Lichtintensität handelt es sich um die gemessene Strahlungsleistung des Lichtes pro Flächeneinheit $\frac{P}{A} = \frac{dW}{A \cdot dt}$. Das heißt in einfachen Worten nichts anderes, als „wieviel Licht trifft in welcher Zeit auf welche Fläche?“

Die Lichtintensität ist nahe bei der Lichtquelle noch auf eine sehr kleine Fläche, nämlich die Sensorfläche in diesem geringem Abstand, konzentriert und hängt bei einer Entfernung von der Lichtquelle von den Grenzen der Randstrahlen des Lichtkegels ab, so dass sie mit zunehmender Entfernung von der Lichtquelle abnimmt. Da die Randstrahlen jedoch den Gesetzen der Raumwinkel folgend einen Kreis als „Grundfläche“ des Licht-

kegels bilden und die Radien zweier dieser Grundflächen in unterschiedlichen Entfernungen dx voneinander nach Strahlensatz proportional zueinander sind, nimmt die gemessene Lichtintensität quadratisch zur Entfernung vom Lichtsprung ab. Dies folgt aus der quadratischen Abhängigkeit der Radien zu den zugehörigen Flächen $A = \pi \cdot r^2$.

In Abbildung 1.1 bedeutet das, dass die Strecken A und B - beide von der Taschenlampe ausgehend und zu ihrem Kreis hinreichend - in demselben Verhältnis zueinander stehen wie die Strecken 1 und 2, die die Durchmesser des Querschnitts des Lichtkegels, nämlich ebenjenen Kreis, repräsentieren.

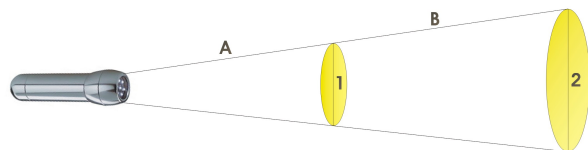


Abbildung 1.1: Abnahme der Lichtintensität in Abhängigkeit von der Strecke

Einfach nachvollziehen lässt sich das, indem mit einer Taschenlampe auf eine weiße Wand geleuchtet wird. Der Kreis, der sich auf der Wand abzeichnet, wird viermal so groß, wenn ich meinen Abstand zur Wand verdopple - sein Radius verdoppelt sich also. Da die Lichtintensität die „Menge des Lichtes“ auf dieser Kreisfläche darstellt, beträgt sie nur noch $\frac{1}{4}$ des vorigen Wertes, denn die Leistung der Taschenlampe und damit das einfallende Licht bleibt unverändert, muss sich aber auf eine viermal größere Fläche verteilen.

Befinde ich mich also einen Schritt von einer Lichtquelle entfernt und bewege mich noch einen weiteren Schritt von ihr weg, so

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

erreicht mich nur noch ein Viertel des Lichtes.

Es ergibt sich also ein theoretischer Zusammenhang von Lichtintensität I_{Licht} und Strecke x von: $I_{\text{Licht}} \sim \frac{1}{x^2} \Rightarrow I_{\text{Licht}} = k \cdot \frac{1}{x^2}$. Dabei ist k eine von der individuellen Beschaffenheit der Lichtquelle abhängige Konstante und somit eine Art „Gütefaktor“- denn je größer k ist, desto größer ist die in einer gewissen Entfernung einfallende Lichtintensität. Vereinfachend kann man also sagen: je größer k ist, desto weiter entfernt ist das Licht einer Lichtquelle noch als von ihr stammend auszumachen und verschwindet nicht gegenüber dem übrigen Licht. Eine Taschenlampe mit größerem k wäre also in größerer Entfernung noch als Lichtpunkt auszumachen als eine mit geringerem k . Es ergibt sich also:

$$I_{\text{Licht}} = k \cdot \frac{1}{x^2} \quad (1.1)$$

1.3.3 Abbildung in die Roboterwelt und mindstormfremdes Material

Der Roverbot wurde leicht verändert und mit einem Lichtsensor parallel zur Unterlage an Sensoreingang 3 sowie einem Drucksensor an Sensoreingang 1 versehen. Außerdem ist auf einen herkömmlicher Tisch eine Skala geklebt worden, indem ein Klebeband (Tesa-Krepp) - ähnlich wie ein Lineal - in 5-cm-Schritten markiert und damit eine vorgegebene gerade Strecke von ca. 180 cm Länge beklebt wurde (siehe Abbildung 1.2, S. 21 und Abbildung 1.3, S. 21).

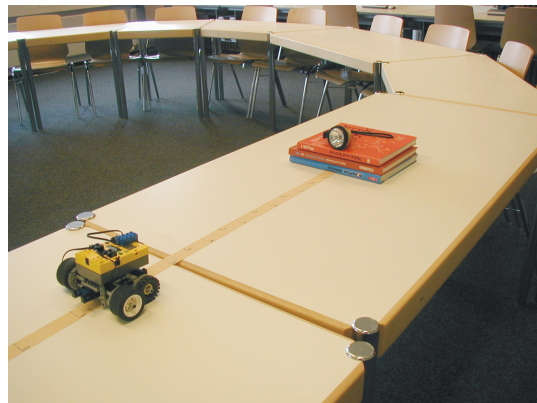


Abbildung 1.2: Versuchsaufbau

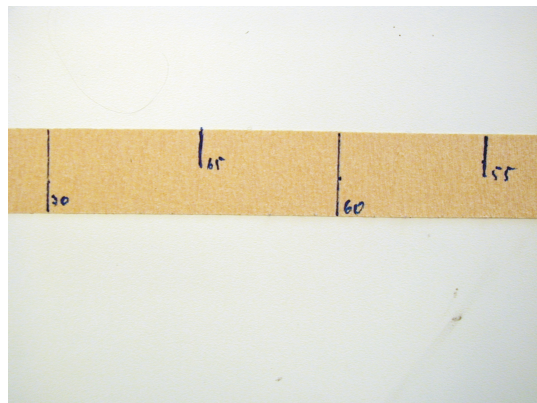


Abbildung 1.3: Skala

Am Nullpunkt dieser Skala wurde nun die Lichtquelle - eine handelsübliche Taschenlampe - aufgestellt und deren Lichtstrahl parallel zur Messstrecke ausgerichtet. Dies lässt sich leicht überprüfen, indem der Roverbot bereits an das Ende der Messstrecke in ca. 180 cm Entfernung gesetzt und der zentrale Punkt des Lichtkegels auf den Lichtsensor ausgerichtet wird. Diese Position ist praktischerweise auch der Startpunkt der Messung, da somit die Ausrichtung des zentralen Punktes des Lichtkegels auf den Messsensor gewährleistet bleibt und eine mögliche, entscheidende Fehlerquelle minimiert wird. Es lohnt sich also, mit der Messung in maximaler Entfernung zu beginnen, da ansonsten die Gefahr besteht,

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

dass der zentrale Punkt des Lichtkegels auf kurze Entfernung noch auf den Lichtsensor gerichtet ist, auf die gesamte Messstrecke bezogen jedoch entscheidend von ihm abweicht. Des Weiteren sollte keine zu intensive Lichtquelle benutzt werden, da der Lichtsensor schnell überlastet ist und bei zu starkem Einfall über weite Strecken eine Auslastung von 100% anzeigt. Es empfehlen sich Taschenlampen mit Glühwendel und höchstens vier 1,5 V Batterien.

Neben dem im Mindstormkasten vorhandenen Material wird also noch Folgendes benötigt:

Anzahl	Art
1	Taschenlampe, Glühwendel mit höchstens vier 1,5 V Batterien
1	Rolle Tesakrepp
1	Lineal / Zollstock (min. 30 cm)
1	Stift

Tabelle 1.1: Mindstormfremdes Material

1.3.4 Programmierung und Durchführung

Der Roverbot sollte so programmiert sein, dass er ständig die einfallende Lichtintensität auf seinen Sensor wahrnimmt und bei einer Veränderung von $\Delta I_{\text{Licht}} = 5\%$ die ansonsten stattfindende Vorwärtsbewegung unterbricht. Auf Knopfdruck des Drucksensors kann diese Bewegung wieder aufgenommen werden, nachdem in der Pause die Position des Roverbots auf der Skala verzeichnet wurde. Dieses Verfahren wird hier siebenmal angewandt, da mehr oder weniger Durchgänge mit der verwendeten Taschenlampe nicht sinnvoll durchgeführt werden konnten. Optimal sollten auf jeden Fall mehr als fünf Messpunkte aufgenommen werden, ansonsten wird der Fehler der aus der Messung resultierenden Aus-

gleichsgerade zu groß. Am Ende der Messreihe spielt der Roverbot zum Signal des Messungsendes eine kurze Melodie. In NQC lautet Programm, wie auf Seite 23 beschrieben. Die RIS-Version ist auf Seite 24 nachzulesen.

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

```
# define Null 60
# define Eins 65
# define Zwei 70
# define Drei 75
# define Vier 80
# define Fuenf 85
# define Sechs 90
# define Ende 95

task main()

{
  SetSensor (SENSOR_1, SENSOR_TOUCH); SetSensor (SENSOR_3, SENSOR_LIGHT);
  OnFwd (OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Null); Off(OUT_A+OUT_C);
until(SENSOR_1==1); OnFwd(OUT_A+OUT_C);
until(SENSOR_3>Eins);
Off(OUT_A+OUT_C); until(SENSOR_1==1);
OnFwd(OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Zwei);
Off(OUT_A+OUT_C); until(SENSOR_1==1);
OnFwd(OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Drei);
Off(OUT_A+OUT_C); until(SENSOR_1==1);
OnFwd(OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Vier);
Off(OUT_A+OUT_C); until(SENSOR_1==1);
OnFwd(OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Fuenf);
Off(OUT_A+OUT_C); until(SENSOR_1==1);
OnFwd(OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Sechs);
Off(OUT_A+OUT_C); until(SENSOR_1==1);
OnFwd(OUT_A+OUT_C);until(SENSOR_3>Ende);
Off(OUT_A+OUT_C); Wait (100); PlaySound (5);
}
```

Tabelle 1.2: Programm in NQC

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?



Abbildung 1.4: Programm in RIS

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

Während der Messung sollte darauf geachtet werden, dass die Raumbelichtung gedimmt ist; sie ist die größte Fehlerquelle dieses Versuchs. Da der Sensor eine prozentuale Auslastung registriert - er verarbeitet dabei einfallenden 0,6 - 760 Lux - kann der nur kleine Messsensor schnell überlastet werden und für die entscheidenden Lichtveränderungen nicht mehr empfindlich genug sein. Aus ähnlichem Grund führt die Verwendung der sensoreigenen Leuchtdiode, die mittels Reflexion zurück auf den Sensor geworfen wird, bei der Messung von Lichtintensitätsveränderungen nicht zu befriedigenden Ergebnissen. Selbst sehr fahle Raumbelichtung ist hierfür zu dominierend und die Messstrecke, auf der überhaupt eine Veränderung des Lichteinfalls registriert wird, ist zu gering. Somit werden andere Fehlerquellen relativ gesehen zu groß, als dass die Ergebnisse akzeptable wären.

Des weiteren ist darauf zu achten, dass der Roverbot eine zur Position der Taschenlampe senkrechte Strecke abfährt, er muss also ein wenig auf der Bahn gehalten werden. Die Motoren, die die beiden Räderseiten antreiben, arbeiten oft ungleichmäßig, so dass bei freier Fahrt immer eine schiefe Bahn zustande kommt. Die Korrektur kann problemlos mit dem Finger vorgenommen werden, möglich ist jedoch auch, aus Zahnradern eine Führungsschiene zu konstruieren.

Bei der Messung empfiehlt es sich darüber hinaus, Strecken zu wählen, die den Sensor nicht voll auslasten. Sobald die Skala auf 100% springt, wird die Messung unsicher, denn es ist nie klar, ob wirklich der zu 100% Auslastung entsprechende Lichteinfall vorliegt, oder etwa der zu 105%. Der minimale Abstand von der Lichtquelle sollte also so gewählt werden, dass der Wert bis auf etwa 95% steigt.

1.3.5 Auswertung

Der Roverbot wird wie beschrieben an das Ende der Messstrecke gestellt und das Programm gestartet. Bei jedem Stoppen des Roboters wird die Position auf der Skala markiert und nach Ende der Messung gemeinsam mit den zugehörigen Messwerten der Lichtintensitätsveränderung in eine Tabelle übertragen. In einer Beispielmessung ergaben sich folgende Werte:

$x/cm \pm 0,1$	$\Delta I_{Licht} \pm 1 / \%$	$x^{-2}/cm^{-2} \cdot 10^{-4}$
164,8	5	$0,36 \pm 0,14$
136,1	10	$0,54 \pm 0,10$
108,2	15	$0,85 \pm 0,11$
84,6	20	$1,40 \pm 0,14$
69,3	25	$2,80 \pm 0,17$
54,7	30	$3,34 \pm 0,22$
51,3	35	$3,80 \pm 0,22$

Tabelle 1.3: Beispielmessung

In der Tabelle wurde die Entfernung x von der Lichtquelle gegen die Änderung der Auslastung des Lichtsensors ΔI_{Licht} aufgetragen. Neben diesen beiden Messwerten wurde der erste Auswertungsschritt vorgenommen und der Kehrwert des Messwertes für die Entfernung x quadriert. Die angegebenen Fehler ergeben sich aus einer Größtfehlerabschätzung und deren Fehlerfortpflanzung.

Somit kann die Übereinstimmung der Messwerte mit dem formalen Zusammenhang (1) überprüft werden. Im ersten Schritt wird nun x gegen ΔI_{Licht} aufgetragen, daraus ergibt sich der Graph in Abbildung 1.5 (S. 26).

1 Wo beginnt das Land der Dämmerung?

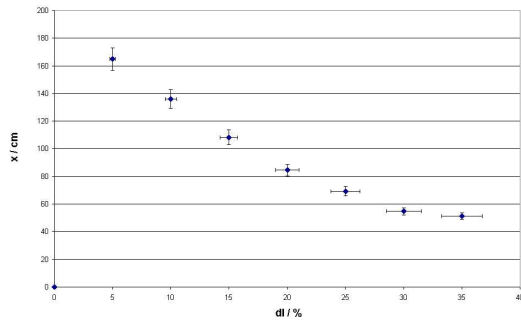


Abbildung 1.5: Auftragung von x gegen ΔI_{Licht}

Wie sich auch schon auf dem Klebeband durch bloßes Ansehen der eingezeichneten Abstände erkennen lässt, ist dieser Zusammenhang keineswegs linear. Das heißt, obwohl der Roverbot immer solange gefahren ist, bis die Lichtintensität sich um genau 5% erhöhte, hat er dabei nicht immer dieselbe Strecke zurückgelegt. Je näher er der Lichtquelle kam, desto weniger weit ist er gefahren.

Eine Aussage über die Genauigkeit der Messung bzw. über die Genauigkeit des Lichtsensors lässt sich jedoch erst nach Durchführung einer Linearisierung treffen. Dabei müsste sich nach Theorie eine Ursprungsgerade ergeben. Es wird nunmehr also in Abbildung 1.6 eine Auftragung der Lichtintensitätsänderung ΔI_{Licht} gegen die reziproke quadratische Strecke x^{-2} vorgenommen.

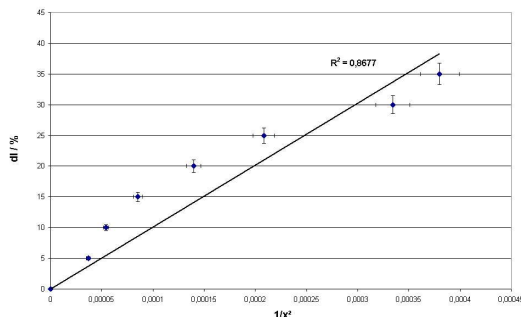


Abbildung 1.6: Auftragung von ΔI_{Licht} gegen x^{-2}

Dabei ergibt sich tatsächlich die erwartete Ursprungsgerade und zwar mit einer Genauigkeit von errechneten 87%. Dies ist zwar nicht exakt, für die Erfassung eines Trends aber ausreichend. Weil sich in diesem Graphen also ein linearer Trend erkennen lässt, ist also auch die quadratische Abhängigkeit von Strecke und Intensität als Trend verifiziert.

Als Fazit kann also gezogen werden, dass sich der Roverbot durchaus als Instrument eignet, um ein physikalisches Gesetz wie das beschriebene zu verdeutlichen. Er ist jedoch keineswegs als exaktes Messinstrument nutzbar, denn dazu sind die Fehlerquellen zu groß und der Sensor zu ungenau. Da dies jedoch gar nicht sein Anspruch sein soll, kann festgehalten werden, dass es problemlos möglich ist, auch physikalische Sachverhalte mit Lego-Mindstorm-Robotern zu behandeln.

2 Ein Abschleppwagen im Einsatz

2.1 Einführung

In diesem Aufgabenkomplex soll der Frage nachgegangen werden, von welchen Faktoren es abhängt, wie schwere Lasten ein Abschleppwagen bewegen kann. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die Zugkraft des Abschleppwagens konstant sei. Hier ist also das Ziel, herauszufinden, wovon es bei einem gegebenen Abschleppwagen mit gegebener Zugkraft abhängt, wie schwere Lasten er bewegen kann. Erste Antworten darauf kann die Betrachtung der Coulomb-Reibung zwischen angehängter Last und Untergrund geben.

Implizit kann der Zentralversuch des Komplexes dann auch zur Bestätigung eines physikalischen Sachverhaltes genutzt werden, nämlich des formalen Zusammenhangs der Coulomb-Reibung:

$$F_{\text{Reibung}} = \mu \cdot F_{\text{Normal}} \quad (2.1)$$

In dieser Formel hängt die Reibungskraft nur von der Beschaffenheit des Untergrundes und der Normalenkraft ab, nicht aber von der Auflagefläche - was intuitiv nicht unbedingt eingängig ist. Es kann also lohnend sein, diese Verständnisbarriere mittels eines Experimentes abzubauen. Dazu soll beobachtet werden, ob ein Abschleppwagen einen schlittenähnlichen Anhänger variabler Auflagefläche und variablen Gewichts über verschiedene Untergründe in Bewegung bringen kann. Die zentrale Aufmerksamkeit gilt dabei dem Anfahrvorgang: Kann der Abschleppwagen den Anhänger in Bewegung bringen,

so kann - in Einklang mit der physikalischen Theorie - davon ausgegangen werden, dass er ihn auch in Bewegung hält. Die Gleitreibung, also der Reibungswiderstand bei sich bewegender Last, ist schließlich immer geringer als die beim Anfahrvorgang dominierende Haftreibung (siehe Kapitel 2.3.2).

Die Aufgaben müssen nicht in voller Länge bearbeitet werden, so ist beispielsweise nach Aufgabe 8, S. 44, ein möglicher Abbruchpunkt vorgesehen. Hier findet der Übergang von einer weitgehend qualitativen Behandlung des Phänomens zu einer zeitaufwändigeren quantitativen Behandlung statt, zu der außerdem gewisse mathematische Fähigkeiten gehören. Diese sollten aber ab Klasse 7 bis 8 kein Problem darstellen. Außerdem ist es sinnvoll möglich, die Aufgaben nach Aufgabe 5 (S. 38) zu beenden, da ab hier die Vorüberlegungen abgeschlossen sind und der Versuch durchgeführt wird. Die offenen Fragen müssten dann allerdings auf andere Weise diskutiert und geklärt werden. Für das Bearbeiten der Aufgaben sollten etwa 45 Minuten veranschlagt werden.

Hinweis: Vor Bearbeitung der Aufgaben sollte die „Anhängerkupplung“ (siehe Kapitel 2.3.3, S.47) am Roverbot bereits installiert worden sein.

2.2 Aufgaben und Lösungen

Die Aufgabenkarten sind so normiert, dass sie entweder eine ganze Seite oder eine halbe Seite Platz einnehmen. Somit ist es möglich, sie als Kopiervorlage zu verwenden und mit einer Papierschneidemaschine zuzuschneiden. Sie sind chronologisch abgedruckt und beginnen auf Seite 30.

Schnellübersicht

Für jeden Arbeitsplatz wird über den Mindestmalkasten hinaus benötigt (siehe auch Kapitel 2.3.3, S.47):

Anzahl	Art	Vorhanden?
1	Pappkarton	
15	100g Massestücke	
1	Schraubhaken	
1	Schnur (Abschleppseil)	
3	Untergründe (z.B. Tisch, Teppich, gummierte Schreibtischunterlage)	
1	Federwaage	
1	Stift	

Dauer: ca. 45 Minuten.

Vorbereitungen: Für jeden Arbeitsplatz ein Satz Aufgabenkarten sowie die Installation der Anhängerkupplung (2.3.3, S.47).

Arbeitsplatz: 2-3 Schüler an einem Tisch.

2.1 Begleittext

Als Kathrin und Lina eines morgens zur Schule gehen, kommen sie an einer Baustelle vorbei. Sie bleiben kurz stehen und sehen einem Bagger zu, der auf einen großen Betonklotz zu fährt. Er stoppt und ein Bauarbeiter kettet den Klotz mit einer Kette an den Bagger. Der Bagger fährt wieder an und versucht, den Klotz zu ziehen, doch obwohl der Motor laut aufheult, kann er ihn nicht bewegen.

Das macht Kathrin nachdenklich: „Ich frage mich, woran es liegt, dass der Bagger diesen Klotz nicht ziehen kann.“

Lina antwortet: „Na, der ist einfach zu schwer! Bei einem, der nur halb so schwer wäre, würde das vielleicht nicht passieren.“

Kathrin ist sich nicht sicher: „Hmm, aber wenn es so einfach ist, wie kommt es dann, dass ein Schlitten zum Beispiel auf Eis einfacher zu ziehen ist als auf Asphalt?“

Lina denkt kurz nach und meint: „Vielleicht ist es ja auch so: Je fester die Verbindung zwischen Klotz und Boden ist, desto schwieriger ist er zu ziehen. Das hängt dann also auch vom Untergrund ab.“

Kathrin überlegt weiter: „Macht es eigentlich einen Unterschied, auf welcher Seite der Klotz liegt?“

„Was meinst Du damit, auf welcher Seite?“ fragt Lina nach.

„Na ja, wenn der Klotz auf einer kleinen Seite liegt, müsste er doch einfacher zu ziehen sein, als wenn er auf einer großen Seite liegt. Dann ist der Kontakt mit dem Boden doch viel geringer, weil die Fläche, auf der er liegt, geringer ist!“ antwortet Kathrin.

„Aber wenn er auf der kleinen Seite liegt, lastet doch das ganze Gewicht des Klotzes auf einer viel kleineren Fläche als wenn er auf der größeren Seite liegt. Der Klotz sinkt dann doch viel tiefer ein.“ gibt Lina zu bedenken.

2.1 Aufgabe

Kathrin und Lina haben einige Vermutungen darüber, was darauf Einfluss nehmen könnte, ob der Bagger den Klotz ziehen kann oder nicht. Notiert diese stichpunktartig.

2.1 Lösungskarte

1. Das Gewicht des Klotzes. (Lina)
2. Der Untergrund unter dem Klotz. (Lina)
3. Die Seite, auf der der Klotz liegt. (Kathrin)

2.2 Aufgabe

Kathrin und Lina stellen in ihrem Gespräch auch einige Vermutungen darüber an, inwiefern die Größen einen Einfluß darauf haben, ob der Klotz ziehbar ist oder nicht. So vermutet Lina zum Beispiel:

„Na, der ist einfach zu schwer! Bei einem, der nur halb so schwer wäre, würde das vielleicht nicht passieren.“

Sie glaubt also:

Ein Klotz ist umso schwieriger zu ziehen, je schwerer er ist.

Formuliert die weiteren Zusammenhänge aus dem Text!

2.2 Lösungskarte

In ihrem Gespräch stellen Kathrin und Lina folgenden Vermutungen an:

Ein Klotz ist umso schwieriger zu ziehen, je...

1. ... schwerer er ist. (Lina)
2. ... fester die Verbindung zwischen Klotz und Untergrund ist. (Kathrin)
3. ... *größer die Seite ist*, auf der er liegt, da er so mehr Kontakt mit dem Boden hat. (Kathrin)
4. ... *kleiner die Seite ist*, auf der er liegt, da somit das Gewicht auf einer kleineren Fläche lastet und er weiter einsinken kann. (Lina)

2.3 Aufgabe

Ihr habt folgendes Material zur Verfügung:

- Diverse verschiedene Massestücke.
- Einen Pappkarton.
- Verschiedene Untergründe (z.B. Tisch, Teppich...).
- Euren Roverbot.

Wie würdet ihr ein Experiment planen, um Kathrin und Linas Vermutungen zu überprüfen?

Hinweis: Zu dieser Karte gibt es keine Hilfs- oder Lösungskarte.

2.2 Begleittext (nach Aufgabe 3)

Kathrin und Lina können sich immer noch nicht einigen: „Ich glaube, wir müssen es einfach ausprobieren.“ schlägt Kathrin vor, „Sonst finden wir nie heraus, ob wir richtig überlegt haben.“.

„Mal sehen, wir wollen also herausfinden, ob das Gewicht einen Einfluss hat.“ grübelt Lina.

„Außerdem wollen wir den Untergrund überprüfen!“ wirft Kathrin ein.

„Gut“, antwortet Lina, „Aber wie? Ich glaube nicht, dass uns der Baggerführer sein Fahrzeug gibt.“

„Wir haben doch unseren Roverbot, den können wir als Modell für den Bagger nehmen. Und als Klotz nehmen wir einfach einen Pappkarton.“ meint Kathrin.

„Das finde ich gut, wir können unterschiedliche Gewichte in den Karton legen und ausprobieren, ob der Roboter die in Bewegung bringen kann.“ sagt Lina.

„Wir müssten das dann mit verschiedenen Untergründen durchführen.“ ergänzt Kathrin.

„Und den Karton auf verschiedene Seiten legen!“, wirft Lina ein, „Wir dürfen nicht vergessen, zu überprüfen, auf welcher Seite er einfacher zu ziehen ist.“

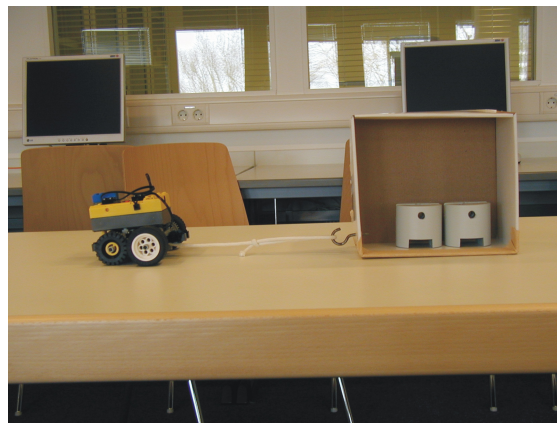
„Am besten legen wir so viel in den Karton, dass der Roverbot ihn nicht mehr ziehen kann und nehmen solange was heraus, bis er es schafft. Dann machen wir das auf einer anderen Auflageseite genauso und das auf verschiedenen Untergründen. Mal sehen, bei welcher Kombination er am meisten ziehen kann.“ meint Kathrin.

2.4 Aufgabe

Wie möchten Kathrin und Lina die Versuche durchführen? Beschreibt kurz die Versuchsdurchführung!

2.4 Lösungskarte

1. Man hakt den Karton am Roverbot fest und legt so viele Massestücke in ihn, dass der Roboter den Karton auf jeden Fall **nicht** mehr in Bewegung bringen kann.
2. Nun nimmt man so viele Gewichte heraus, dass der Roverbot den Karton gerade in Fahrt bringt. Um zu testen, ob der Roverbot den Karton ziehen kann, reicht es, auszuprobieren, ob er mit dem Karton als Anhänger anfahren kann! **Die Reifen dürfen dabei nicht durchdrehen!**
3. Man notiert das Gewicht, das der Roverbot höchstens ziehen kann.
4. Dieser Vorgang wird mit drei Untergründen (einer davon kann der Tisch sein) wiederholt.
5. Zuletzt wird die Auflageseite des Kartons gewechselt und der gesamte Versuch mit den drei Untergründen wiederholt. Die beiden Auflageseiten könnten sein:



2.5 Aufgabe

Führt die Versuche durch, wie sie auf der Lösungskarte zu Aufgabe 2.4 beschrieben sind.

Hinweis: Auf der Hilfekarte findet ihr Tabellen, in die ihr die gemessenen Werte eintragen könnt.

2.5 Hilfekarte

Auflageseite 1:

Untergrund	m / kg

Auflageseite 2:

Untergrund	m / kg

2.6 Aufgabe

Welche Schlüsse könnt ihr aus euren Ergebnissen ziehen? Versucht, Kathrin und Linas Fragen zu beantworten:

1. Macht es für die größte ziehbare Masse einen Unterschied, auf welchem Untergrund der Karton lag?
2. Hat die Auflageseite irgendwelche Auswirkungen?

2.6 Lösungskarte

Die Messdaten zeigen unterschiedliche ziehbare Massen für die verschiedenen Untergründe. Bei einem einzelnen Untergrund macht jedoch die Auflageseite keinen Unterschied für die ziehbare Masse.

Der Untergrund hat also tatsächlich eine Auswirkung, die Auflageseite aber nicht.

2.7 Aufgabe

Fasst die Ergebnisse eures Versuches in „je...desto“- Sätzen zusammen.

Ein Beispiel dafür aus der Sprichwortschatzkiste:

„Je später der Abend, desto lieber die Gäste.“

2.7 Lösungskarte

1. Je größer die Masse des Anhängers ist, desto schwieriger ist er zu ziehen.
2. Je fester die Verbindung zwischen Anhänger und Untergrund ist, desto schwieriger ist er zu ziehen.

2.8 Aufgabe

Was haltet ihr nun von Kathrin und Linas Überlegungen in Begleittext 2.1? Fallen euch Punkte auf, bei denen Kathrin und Lina offensichtlich falsch überlegt haben?

2.8 Lösungskarte

Aus dem Experiment kann man schließen, dass Kathrin und Lina Recht hatten mit den Vermutungen:

1. Der Klotz ist umso schwieriger zu ziehen, je schwerer er ist.
2. Der Klotz ist umso schwieriger zu ziehen, je fester die Verbindung zwischen Klotz und Untergrund ist.

Doch bei dem Punkt, wo sie uneins waren, lagen sie beide falsch:

1. Kathrin meinte, dass der Klotz umso schwieriger zu ziehen sei, je größer die Fläche sei, auf der er liege.
2. Lina meinte, dass der Klotz umso schwieriger zu ziehen sei, je kleiner die Fläche sei, auf der er liege.

Nach den Ergebnissen der Messung hatte die Auflageseite schließlich gar keinen Einfluss darauf, ob der Bagger den Klotz ziehen konnte oder nicht.

2.9 Aufgabe

Nehmt nun eine Federwaage, hakt sie an eure Anhängerkupplung und lasst den Roverbot ziehen, um dessen Zugkraft F_{Zug} zu messen. **Lest genau dann den Wert von der Federwaage ab, bevor die Reifen des Roverbot durchdrehen. Notiert den gemessenen Wert.**

2.9 Hilfekarte

Ihr habt nun festgestellt, dass ein Block umso schwieriger zu ziehen ist, je schwerer er ist und je ungünstiger der Untergrund ist. Physikalisch ausgedrückt heißt das folgendes:

$$F_{Zug} = m_{Untergrund} \cdot F_g$$

Dabei ist F_{Zug} die Zugkraft des Roboters und $F_g = m_{Karton} \cdot g = m_{Karton} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}$ die Gewichtskraft, mit der der Karton auf den Untergrund drückt. $m_{Untergrund}$ kann irgendeine Zahl sein und beschreibt die Eigenschaft des Bodens, die Kiste „festzuhalten“. Ihr habt nun gemessen, bei wieviel Gewicht der Roboter den Karton noch ziehen kann. Damit habt ihr F_g bestimmt, denn diese Masse müsst ihr nur noch mit $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ multiplizieren: $F_g = m_{Karton} \cdot g$. Dann habt ihr die Zugkraft F_{Zug} des Roboters gemessen. Wenn ihr nun die Zugkraft durch die Gewichtskraft teilt, dann bekommt ihr m :

$$m = \frac{F_{Zug}}{F_g}$$

Berechnet m für alle Untergründe!

Hinweis: Auf der Hilfekarte 2 findet ihr eine Tabelle, in die ihr die Werte eintragen könnt.

2.9 Hilfekarte 2

Untergrund	F_g	F_{Zug}	m

Mit diesem Faktor m könntet ihr nun zum Beispiel berechnen, welche Last ein stärkerer Roboter, also einer mit größerer Zugkraft, auf einem der ausgemessenen Untergründe ziehen kann. m spielt also eine große Rolle in der Technik und wird auch als der „Haftreibungskoeffizient“ der „Coulomb-Reibung“ bezeichnet.

2.3 Vertiefender Begleittext

Dieser kurze Abschnitt soll die Schnellübersicht ergänzen und Hintergrundinformationen für den Kursleiter liefern. Darüber hinaus wird der zentrale Versuch einmal explizit ausgewertet.

2.3.1 Voraussetzungen

Bei diesem Versuch ist die Überprüfung des physikalischen Zusammenhangs der Coulomb-Reibung eines der Ziele. Dabei werden sowohl die in der Formel $F_{\text{Reibung}} = \mu \cdot F_{\text{Normal}}$ - in den Aufgaben identisch mit $F_{\text{Zug}} = \mu_{\text{Untergrund}} \cdot F_g$ - angegebenen Parameter variiert, als auch die intuitive Verknüpfung von Reibung und Auflagefläche auf ihren Wahrheitsgehalt überprüft.

2.3.2 Theorie

Die Coulomb-Haftreibung, die hier deshalb betrachtet werden soll, weil sie immer größer ist als die Gleitreibung, hängt von zwei Faktoren ab: Der Normalkraft F_N des Anhängers - auf der horizontalen Ebene identisch mit der Gewichtskraft - und dem dimensionslosen Reibungskoeffizienten der Haftreibung μ_{Haft} , der den Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Kräften darstellt. Sie wird also nur von der Normalkraft und einer Materialeigenschaft, die das mechanische Verhalten der beiden in Kontakt tretenden Stoffe von Untergrund und Körper beschreibt, bestimmt.

$$F_R = \mu_{\text{Haft}} \cdot F_N \quad (2.2)$$

Dies ist völlig analog zur schiefen Ebene, bei der der Haftreibungskoeffizient den Tan-

gens des Winkels darstellt, bei der ein Objekt gerade beginnt, zu rutschen.

In diesem Versuch sollen also diese beiden Faktoren - Untergrund und Normalen- bzw. Gewichtskraft - variiert und betrachtet werden, bei welchen Werten der Abschleppwagen seinen Anhänger jeweils in Fahrt bringen kann. Des weiteren kann gezeigt werden, dass die Auflagefläche des Anhängers auf den Untergrund keinerlei Auswirkungen auf diese Frage hat.

Zum Vergleich sind in der folgenden Tabelle einige Referenzwerte des Haftreibungskoeffizienten dargestellt, die empirisch ermittelt wurden:

Materialpaarung	μ_{Haft}
Autoreifen auf Straße	0,7...0,9
Holz auf Holz	0,5
Stahl auf Eis	0,03
Stahl auf Stahl	0,15...0,5
Stahl auf Teflon	0,4
Leder auf Metall	0,4
Ski auf Schnee	0,1...0,3

Tabelle 2.1: Theoretische Werte für den Haftreibungskoeffizienten μ_{Haft}

2.3.3 Abbildung in die Roboterwelt und mindstormfremdes Material

Ein Abschleppwagen ist zunächst einmal ein Fahrzeug - ebenso wie das einfache Modell des Roverbot. Er kann also als Ausgangsmodell gewählt werden. Was einen Abschleppwagen jedoch von anderen Fahrzeugen unterscheidet, ist im Wesentlichen sein großer Arm, mit dem er defekte Fahrzeugen an sich

2 Ein Abschleppwagen im Einsatz

binden und eben abschleppen kann - bei anderen Modellen reicht aber auch einfach ein Abschleppseil oder eine Abschleppstange aus. Dem Roverbot muss also irgendeine Form von Anhängerkupplung hinzugefügt werden (siehe Abb. 2.1).

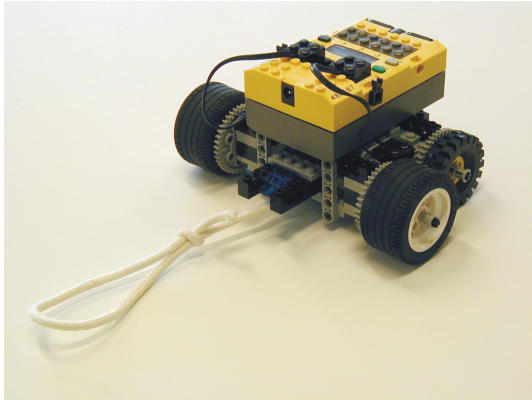


Abbildung 2.1: Rückansicht des verwendeten Roverbots

Für die Zwecke dieses Versuches reicht ein „Abschleppseil“ aus, wie es in der realen Welt im Zubehörsatz jedes Fahrzeugs vorhanden sein sollte. Es kann am einfachsten durch ein beliebiges Stück dünnen Seils simuliert werden. Dabei bietet es sich an, dieses Seil an der Unterseite des Roverbots um die Vorderachse zu kneten und unter dem Fahrzeug über der Stützkonstruktion der Hinterachse entlang zuziehen, damit bei Belastung des Seils kein Drehmoment entsteht, das dazu führt, dass der Roverbot sich aufbäumt und die Vorderräder den Kontakt mit der Straße verlieren. In diesem Fall würde nicht die volle Leistung genutzt werden und der Versuch wäre nicht vergleichbar zu den Fällen, bei denen bei geringerer Belastung kein Aufbäumen auftritt (siehe Abb. 2.2).

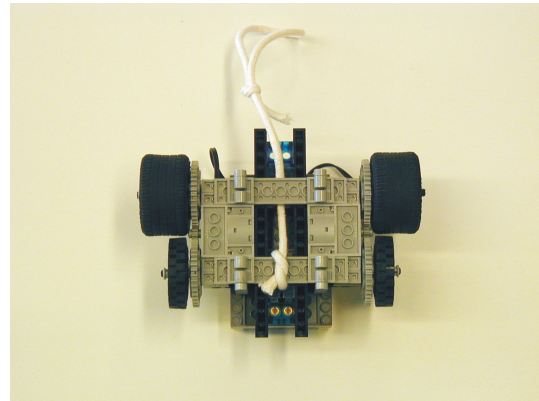


Abbildung 2.2: Verlauf des Abschleppseils

An die „Anhängerkupplung“ - also das provisorische Abschleppseil - wird nun ein geeigneter Anhänger gekoppelt, der drei Voraussetzungen erfüllen sollte:

1. Es sollte erstens möglich sein, ihn mit Massestückchen so zu beladen, dass seine Masse von ca. 100g bis 2kg verändert werden kann.
2. Er darf zweitens keine Räder haben, da ein ideales Rad gar keinen Reibungswiderstand aufweist, sicher aber nicht einfach nach den Gesetzmäßigkeiten der oben beschriebenen Coulomb-Reibung untersucht werden kann.
3. Drittens sollte es möglich sein, ihn mit verschiedenen großen Auflageflächen in Kontakt mit dem Untergrund zu bringen - der Roboter muss ihn aber dennoch ziehen können. Empfehlenswert ist also ein Quader mit deutlich unterschiedlichen Seitenlängen. Der Unterschied in der Fläche der Seitenstücke muss dabei optisch gut nachvollziehbar sein!

Im einfachsten Falle kann ein Pappkarton als Modell dienen. Die Masse des Kartons

2 Ein Abschleppwagen im Einsatz

kann dann reguliert werden, indem geeignete Gegenstände in ihn gelegt werden, also beispielsweise Massestücke. Sand ist besonders hilfreich, da er sich am Boden gut und gleichmäßig verteilt, lässt sich aber nur schwer handhaben. Trotzdem kann die Verteilung des Sandes nach einem abrupten Bremsvorgang ihrerseits Ausgangspunkt für eine Diskussion sein, denn wenn der Pappkarton mit einer transparenten Seite ausgestattet ist, lässt sich gut erkennen, dass der Sand sich zu der dem Roboter zugewandten Seite auftürmt. Die Grundlagen der trägen Masse könnten hier also demonstriert werden.

Wichtig ist auch, dass die Pappe stabil genug ist, um in ihr beispielsweise einen schraubbaren Haken zu versenken, an dem der Karton von dem Roboter gezogen werden kann. Im einfachsten Falle werden also neben dem Roboter folgende Materialien benötigt:

Anzahl	Art
1	Pappkarton
mehrere	Massestücke unterschiedlicher Masse, die von 100g bis zu 2kg einige Kombinationen darstellen können
1	Schraubhaken
1	Schnur (Abschleppseil)
3	Untergründe (z.B. Tisch, Teppich, gummierte Schreibtischunterlage)
1	Federwaage

Tabelle 2.2: Mindstormfremdes Material

2.3.4 Programmierung

Für diesen Versuch ist kein aufwendiges Programm nötig. Der Roverbot sollte nur mit voller Leistung geradeaus fahren können, dies

gehört jedoch zu den vorprogrammierten Programmen. Alternativ können zwar auch verschiedene Fahrtgeschwindigkeiten programmiert werden, dies führt jedoch von der eigentlichen Intention des Versuches hin zu einer ihm verwandten Leistungsmessung.

2.3.5 Durchführung

Bei diesem Versuch soll der Anhänger - vielleicht ein Karton - auf verschiedene Untergründe gelegt werden und dabei jeweils durch Probieren herausgefunden werden, wieviele Gewichtsstücke maximal in den Hänger gelegt werden können, dass der Roboter ihn gerade noch in Bewegung bringen kann.

Dieser Ablauf soll mit zwei Auflageseiten unterschiedlicher Fläche durchgeführt werden, so wie in den Abbildungen dargestellt.

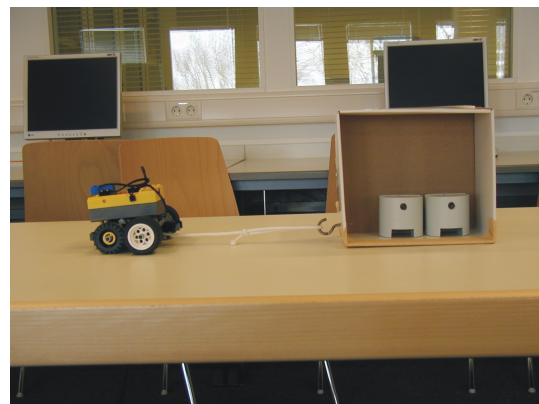


Abbildung 2.3: Auflageseite 1

Während des Versuches sollte auch die Zugkraft des Roverbots gemessen werden. Dazu wird eine Federwaage an die Anhängerkupplung gekoppelt. Darauf folgend wird der

2 Ein Abschleppwagen im Einsatz



Abbildung 2.4: Auflageseite 2

Roverbot gestartet und die Federwaage festgehalten, so dass der Roboter an der Federwaage zieht. Der maximale Wert auf der Federwaage wird festgehalten. Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass diese parallel zum Untergrund ausgerichtet ist, da ansonsten nicht die wahre Zugkraft, sondern nur eine Komponente, angezeigt wird. Danach kann die eigentliche Messung beginnen.

Zunächst wird der Karton also mit Auflageseite 1 auf den Tisch gelegt und mit 2 kg beladen. Der Roverbot soll dann gestartet werden und ziehen. Nun werden so lange Gewichtsstücke aus dem Anhänger entfernt, bis der Roverbot den Karton in Bewegung bringen kann. Zur Kontrolle sollte er dann wieder abgeschaltet werden und den Anfahrvorgang noch einmal mit einem geringfügig höheren Gewicht durchführen werden. Das maximale Gewicht wird notiert. Dieser Vorgang wird dann noch einmal mit Auflageseite 2 durchgeführt und auf allen drei Untergründen wiederholt.

2.3.6 Auswertung

Bei einer Beispielmessung ergaben sich die in den Tabelle 2.3 und 2.4 dargestellten Werte.

Untergrund	m / kg $\pm 50g$
Tisch	1,3
Teppich	0,45
Klettseite des Teppichs	0,25
gummierte Schreib- tischunterlage	0,2

Tabelle 2.3: Maximale anziehbare Hängermasse auf verschiedenen Untergründen für Auflagefläche 1

Untergrund	m / kg $\pm 50g$
Tisch	1,3
Teppich	0,5
Klettseite des Teppichs	0,25
gummierte Schreib- tischunterlage	0,2

Tabelle 2.4: Maximale anziehbare Hängermasse auf verschiedenen Untergründen für Auflagefläche 2

Die Fehler ergaben sich aus einer vorsichtigen Größtfehlerabschätzung. Wie zu sehen ist, ergeben sich ganz nach Theorie für die beiden verschiedenen Auflageseiten dieselben Werte, nur die Werte für die Teppichunterseite differieren. Diese Abweichung liegt jedoch im Rahmen des Messfehlers.

Vor dem Versuch wurde die Zugkraft des Roverbots gemessen. Dabei ergab sich der in Tabelle 2.5 angegebene Wert.

F_{Zug}	$4N \pm 0,2N$
-----------	---------------

Tabelle 2.5: Zugkraft des Roverbots

Nun können also die Haftreibungskoeffizienten für die vier verwendeten Untergründe berechnet werden. Aus der Formel für die Coulomb-Reibung $F_R = \mu_{Haft} \cdot F_N$ ergibt sich nach Umstellung:

2 Ein Abschleppwagen im Einsatz

$$\mu_{Haft} = \frac{F_R}{F_N} \quad (2.3)$$

Dabei entspricht F_R betragsmäßig genau der Zugkraft des Roverbots, da genau so gemessen wurde, dass die Zugkraft des Roverbots die Reibungskraft gerade ausgeglichen hat. Die Normalenkraft ist auf der horizontalen Ebene gleich der Gewichtskraft und ergibt sich aus dem Produkt von Masse des Hängers m und Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ zu $F_N = F_g = m \cdot g$. Auf der horizontalen Ebene gilt also für den Reibungskoeffizienten:

$$\mu_{Haft} = \frac{F_{Zug}}{F_g} = \frac{F_{Zug}}{m \cdot g} \quad (2.4)$$

Es folgen also die aus den Messwerten berechneten Werte für die Haftreibungskoeffizienten in Tabelle 2.6.

Untergrund	$\mu_{Haft} \pm 0,2$
Tisch	0,31
Teppich	0,86
Klettseite des Teppichs	1,63
gummierte Schreib- tischunterlage	2,04

Tabelle 2.6: Gemessene Haftreibungskoeffizienten μ_{Haft} für verschiedene Untergründe

Diese Ergebnisse liegen in der Größenordnung von den in Tabelle 2.1, S.47, angegebenen Referenzwerten. Sie können demzufolge als realistisch angenommen werden.

2.3.7 Variationsmöglichkeiten

Der Versuch bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, ihn auszuweiten und seine physikalische Aussage zu verändern. Die naheliegendste Alternative ist es, den Versuch

auf einer schiefen Ebene durchzuführen, so dass gezeigt werden kann, dass eben nicht die Gewichtskraft, sondern die Normalenkraft der Last auf den Untergrund, der wesentliche Faktor für die Reibung ist. Darauf wurde hier jedoch verzichtet, da die hierfür erforderliche Fähigkeit der Komponentenzerlegung eines Vektors in der Mittelstufe noch nicht vorausgesetzt werden kann.

Weiterhin ist es möglich, den Versuch, wie bereits beschrieben, mit Sand im Hänger durchzuführen. Die Verteilung des Sandes bei einem abrupten Anfahr- oder besser Bremsvorgang kann die Grundlagen des Trägheitssatzes demonstrieren.

Außerdem bietet sich eine Verbindung mit einer Leistungsmessung an. Zum Beispiel könnte der Roboter den Hänger über eine gewisse Strecke ziehen. Über die dafür benötigte Zeit und die Gleitreibungskraft kann die Leistung des Roverbots berechnet werden.

Tabellenverzeichnis

1.1	Mindstormfremdes Material	22
1.2	Programm in NQC	23
1.3	Beispielmessung	25
2.1	Theoretische Werte für den Haftreibungskoeffizienten μ_{Haft}	47
2.2	Mindstormfremdes Material	49
2.3	Maximale anziehbare Hängermasse auf verschiedenen Untergründen für Auf- lagefläche 1	50
2.4	Maximale anziehbare Hängermasse auf verschiedenen Untergründen für Auf- lagefläche 2	50
2.5	Zugkraft des Roverbots	50
2.6	Gemessene Haftreibungskoeffizienten μ_{Haft} für verschiedene Untergründe . .	51

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abnahme der Lichtintensität in Abhängigkeit von der Strecke	20
1.2	Versuchsaufbau	21
1.3	Skala	21
1.4	Programm in RIS	24
1.5	Auftragung von x gegen ΔI_{Licht}	26
1.6	Auftragung von ΔI_{Licht} gegen x^{-2}	26
2.1	Rückansicht des verwendeten Roverbots	48
2.2	Verlauf des Abschleppseils	48
2.3	Auflageseite 1	49
2.4	Auflageseite 2	50

Index

- Abschleppseil, 48
- Anhänger, 48
- Anhängerkupplung, 48
- Auflageseite, 49
- Ausgleichsgerade, 22
- Checkliste, 4, 29
- Drehmoment, 48
- Ebene,
 - schiefe, 51
- Federwaage, 50
- Fehlerquelle, 25, 50
- Kraft
 - Gewichts-, 47
 - Normalen-, 47
- Kraft,
 - Zug-, 49
- Leistung, 48
- Leistung,
 - Leistungsmessung, 51
- Licht
 - intensität, 2, 21, 22
 - intensitätsänderung, 25, 26
- Linearisierung, 26
- Massestück, 48
- Material,
 - mindstormfremdes, 49
- Motor, 25
- Pappkarton, 48
- Programm, 22, 49
- Raumbeleuchtung, 25
- Raumwinkel, 20
- Reibung
 - Coulomb-, 27
 - Gleit-, 47
 - Haft-, 47
- Reibung,
 - Reibungskoeffizient, 50
- Reibungskoeffizient, 47
- Roverbot, 20–22, 25, 26, 47
- Schnellübersicht, 4, 29
- Sensor
 - Druck-, 21, 22
 - Licht-, 20, 21, 26
- Trägheit, 49
- Ursprungsgerade, 26