

Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformationen für Lehrer

Ein beliebtes Thema: Fehler in astronomischen Entfernungsbestimmungen

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

Wer sich einigermaßen regelmäßig über die aktuellen Probleme der astronomischen Forschung informiert, der bemerkt relativ schnell, dass sich unter diesen auch eines befindet, das man mit Fug und Recht als Dauerbrenner bezeichnen kann. Gemeint ist die Bestimmung von Entfernungen im Universum. Deren Bedeutung liegt auf der Hand, sind doch mit den kosmischen Entfernungen viele andere astronomische Fragestellungen verwoben; etwa die Ermittlung von Zustandsgrößen der Sterne und Galaxien, die Untersuchung des räumlichen Bauplanes unseres Universums oder die Abschätzung des Alters von Sternhaufen sowie des gesamten Kosmos. Es ist unmöglich, auf den wenigen nachfolgenden Seiten auch nur einen groben Überblick über die verschiedenen Methoden der astronomischen Entfernungsbestimmung zu geben.

Die Entfernungsbestimmung spielt (als Streckenmessung) im Physikunterricht eine sehr große Rolle. Im herkömmlichen Physikunterricht werden die verschiedenen Methoden der Entfernungsbestimmung aber nicht systematisch behandelt. Fachübergreifende Bezüge zur Mathematik, Astronomie und Geographie werden dadurch nicht konsequent ausgeschöpft, die mit verschiedenen Distanzmessungen verbundenen Schwierigkeiten, insbesondere die mit diesen Schwierigkeiten verknüpften Fehlerquellen vom Schüler nicht zusammenhängend erfasst.

Wir unterbreiten daher nachfolgend einen Vorschlag zur systematischen Einführung der Entfernungsbestimmung im Physikunterricht, um anschließend ausführlich eine Variante zur Einführung der Parallaxenmessung zu diskutieren. Abschließend werden Möglichkeiten aufgezeigt, die Fehler trigonometrischer Parallaxen zu veranschaulichen.

Die Systematik der Entfernungsbestimmung

Wie man die Distanz zwischen den Punkten A und B ermittelt, hängt hauptsächlich von zwei Parametern ab: Erstens von der gewünschten Genauigkeit und zweitens von der Zugänglichkeit der Punkte. Die Zugänglichkeit entscheidet darüber, ob die Streckenmessung direkt oder indirekt erfolgt. Die nachfolgend gegebene tabellarische Übersicht verdeutlicht die wesentlichen Verfahren und kann als Kopiervorlage genutzt werden. Sie muss für den Schüler aber ausführlich erläutert werden. Bei Bedarf kann und sollte man natürlich eine im Unterricht der jeweiligen Klassenstufe nicht gebrauchte Spalte der Tabelle vor dem Kopieren abdecken.

Wie man erkennt, ist die Übersicht von typischen Streckenlängen aus der Alltagserfahrung hin zu immer größeren Distanzen geordnet. Völlig fehlt die Messung von kleinen Distanzen im atomaren Bereich. Hier wäre neben den bereits genannten Parametern auch noch die quantenphysikalische Unbestimmtheit in Rechnung zu stellen, die exakte Messungen kleinster Strecken einschränkt.

Gesucht ist die Distanz zwischen zwei Punkten A und B

A und B sind leicht zugänglich und nahe beieinander	B ist nicht zugänglich oder sehr weit entfernt oder zwischen A und B kann kein Maßstab ausgelegt bzw. eben abgetragen werden.			
Direkte Messung mit einem Maßstab	Indirekte Messverfahren			
<ul style="list-style-type: none"> – Lineal – Bandmaß – Distanzmesser mit automatischer Zählung (Schrittzähler, Kurvimeter, Zählwalze am Tacho) 	Laufzeitmethode (Reflexion am Endpunkt, Bestimmung der Signallaufzeit) <ul style="list-style-type: none"> – Radar – Ultraschallmessung – gepulste Laserstrahlen 	Trigonometrie (Auslegen eines Dreiecks mit Hilfspunkt und Winkelmessung) <ul style="list-style-type: none"> – geodätische Vermessungen – trigonometrische Parallaxen 	Entfernungsmessung aus der Strahlung (aus bekannten Merkmalen der Strahlung eines Objektes (z. B. der absoluten Helligkeit oder der zeitlichen Veränderlichkeit) und der wahrgenommenen Strahlung (z. B. scheinbaren Helligkeit) folgt die Distanz)	Kosmologische Entfernungsmessung (durch Hubble-Effekt und Rotverschiebung)
Beispiele: Ermittlung eines Bremsweges, Streckenmessungen im Sport (Kugelstoßen), gefahrene Kilometer im Auto	Beispiele: Überwachung der Distanz Erde–Mond, Bestimmung der Entfernungen Erde–Venus, Erde–einige Asteroiden, Radarabtastung von Planeten durch Raumsonden, Flugüberwachung	Beispiele: Bestimmung von Bergeshöhen, trigonometrische Dreiecksketten, Ermittlung von Distanzen zu relativ nahen Sternen	Beispiele: Bestimmung der Entfernung von Sternen, von Supernovae, von Galaxien	Beispiele: Entfernungsbestimmung von Quasaren und anderen frühen Galaxien

Die trigonometrischen Sternparallaxen

Astronomische Trigonometrie beruht auf der Messung von Parallaxenwinkeln. Solche Winkel sind Ausdruck der scheinbaren Verschiebung, die ein relativ nahes Objekt erleidet, wenn man es unter verschiedenen Blickrichtungen betrachtet. Erfahrungsgemäß muss man den Schülern das Phänomen der Parallaxenwinkel, insbesondere aber die Messung solcher Winkel, ausführlich verdeutlichen. Meist war nämlich der Geometrieunterricht seit der Grundschule recht erfolgreich; die Schüler wollen eine Winkelmessung an einem Körper oder an einer Zeichnung immer durch das unmittelbare Anlegen eines Winkelmessers bewerkstelligen. Wie aber misst man scheinbare Winkelveränderungen?

Die Abb. 1 gibt in Verbindung mit einer praktischen Übung im Gelände eine Antwort auf diese Frage. Vielleicht erfüllt schon der Schulhof die folgende Voraussetzung: Benötigt werden ein recht naher Gegenstand (ca. 50 m, z. B. ein Baum...) und ein sehr weit entferntes Objekt (ab 2–3 km, z. B. ein Schornstein), die etwa in der gleichen Blickrichtung liegen sollen. Man markiert im Gelände zwei möglichst weit auseinanderliegende Punkte A und C, sodass – wie in der Abb. 1 angedeutet – von A aus gesehen der Schornstein links, von C aus gesehen rechts vom Baum erscheint (diese Anforderung ist eigentlich nicht notwendig, erleichtert aber den Schülern die räumliche Vorstellung).

In der Abb. 1 sind die gestrichelten Linien die Blickrichtungen zum sehr weit entfernten Schornstein. Diese verlaufen von jedem Beobachtungspunkt aus nahezu parallel. Die Blickwinkel zwischen Schornstein und Baum (α und β) finden sich als Stufenwinkel an geschnittenen Parallelen und als Scheitelwinkel an der Spitze des Messdreiecks am Punkt B (Baum) wieder. Wie man anhand der Abb. 1 erkennt, lässt sich der Winkel ε durch Addieren von α und β berechnen. ε ist der Parallaxenwinkel, der sich ganz offensichtlich bestimmen lässt, ohne sich zum Zielpunkt B zu begeben.

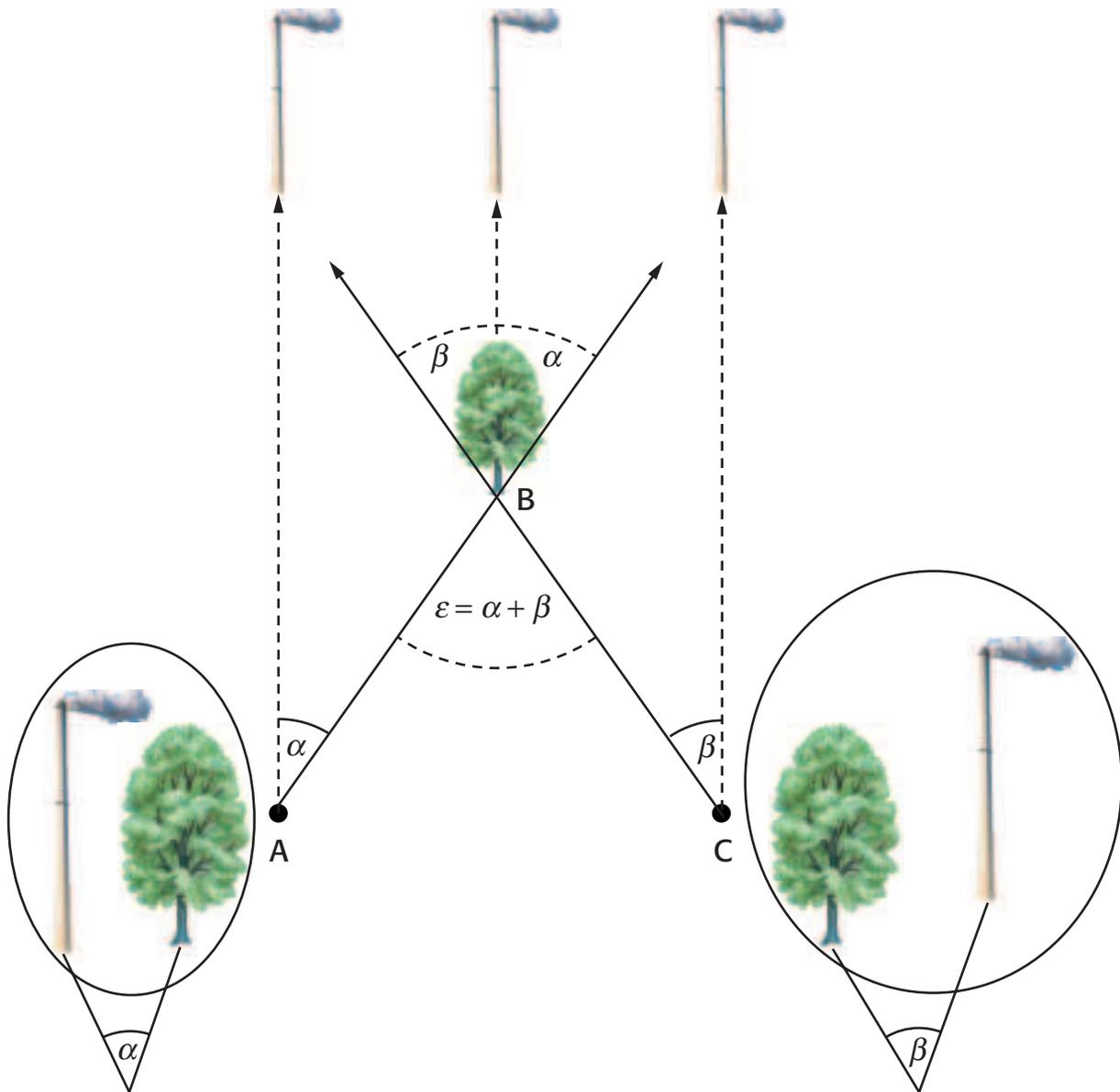


Abb. 1

Zur praktischen Messung benötigt man im einfachsten Fall lediglich drei Tische, auf denen man je ein größeres Blatt Zeichenkarton befestigt hat und je Tisch drei Stecknadeln. Man teilt die Schulklasse in drei Gruppen. Je eine Gruppe begibt sich zu den Punkten A, B und C, baut die Tische auf und misst die Winkel α , β und ϵ . Dazu befestigt man eine Stecknadel auf dem Zeichenkarton und steckt die zwei anderen Nadeln so ein, dass sie in der Visierlinie zum entsprechenden Zielpunkt stehen (Abb. 2). Mit dem Winkelmesser können die Winkel dann auf den Zeichenkarton ausgemessen werden. Die Gruppen bei A und C können ihre Resultate addieren und erhalten genau den gleichen Winkel, wie die Gruppe, die bei B den Winkel zwischen A und C beobachtet hat.

Neben dem Messresultat bleibt festzuhalten: Die Messung gelingt nur dann, wenn man einen sehr weit entfernten und damit scheinbar fest stehenden Bezugspunkt für die Parallaxenmessung (den Schornstein) gewählt hat.

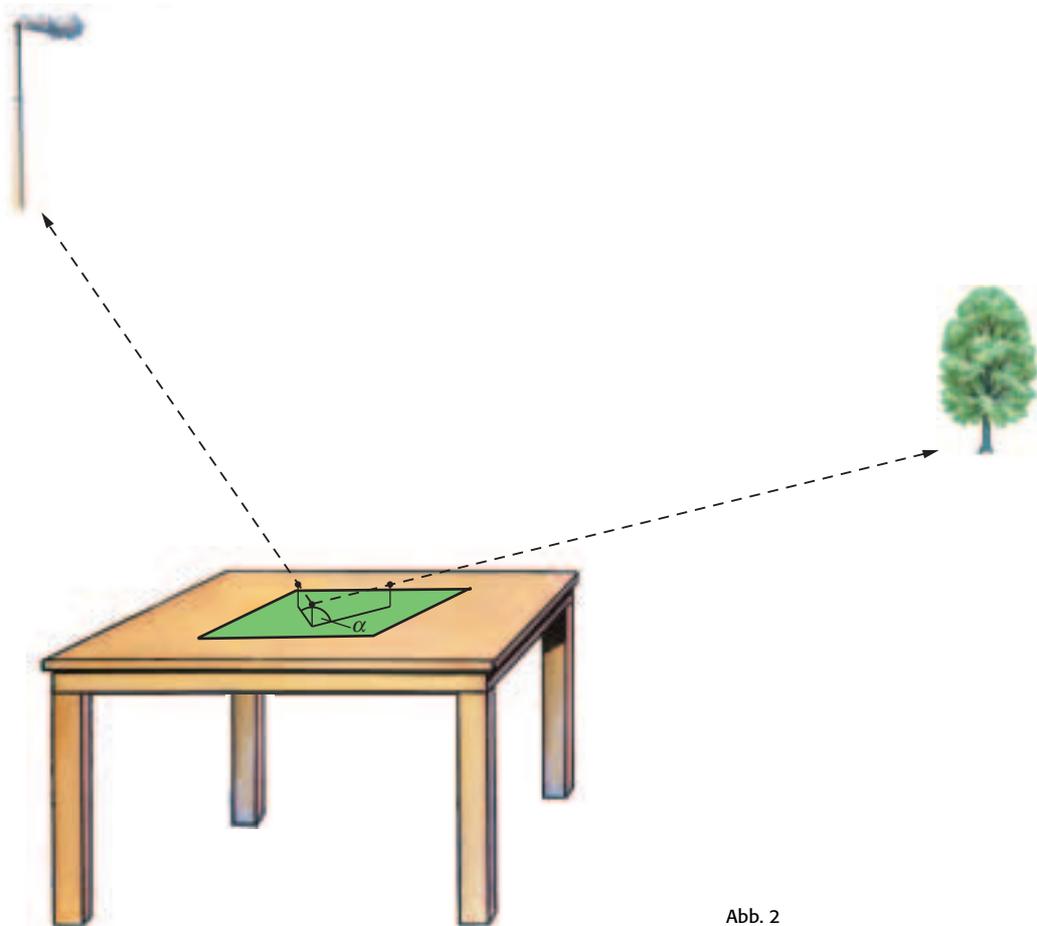


Abb. 2

Da man bei astronomischen Entfernungsmessungen im Regelfall nicht an den Zielpunkt gelangen kann, ist die Methode der trigonometrischen Parallaxen ein geeignetes Mittel zur Distanzermittlung. Will man beispielsweise die Entfernung zu einem Stern auf diese Weise bestimmen, benötigt man offenbar noch sehr viel weiter entfernte Vergleichssterne (die „Schornsteine“ in unserem Beispiel). Die Abb. 3 übersetzt die Abb. 1 in den astronomischen Anwendungsfall.

Die Bewegung der Erde um die Sonne eröffnet die Möglichkeit, einen Stern im Laufe eines Jahres von verschiedenen Punkten aus anzuvisieren. Vor dem Hintergrund noch weiter entfernter Sterne lässt sich dann möglicherweise ein Parallaxenwinkel messen. In der Astronomie hat man sich darauf geeinigt, den halben Parallaxenwinkel $p = \varepsilon/2$ für die Entfernungsberechnung zu verwenden. Man könnte deshalb im rechtwinkligen Dreieck Stern, Erde, Sonne mithilfe der bekannten Entfernung Erde–Sonne (die Astronomische Einheit) und dem gemessenen Winkel p unmittelbar die Sternentfernung in Astronomischen Einheiten ausrechnen. Allerdings sind selbst die nächsten Sterne rund 270 000 Astronomische Einheiten von der Erde entfernt, sodass man aus praktischen Gründen eine neue Entfernungseinheit in die Astronomie eingeführt hat, das Parsec (Parallaxensekunde). Man definiert:

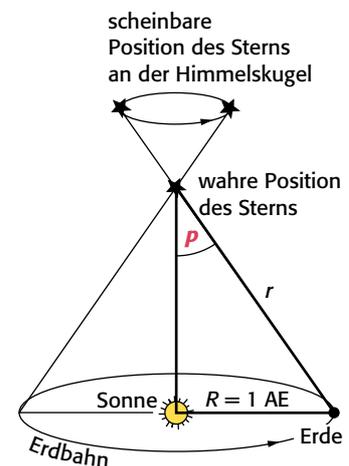


Abb. 3

1 pc ist die Entfernung r , aus der die halbe große Achse der Erdbahn um die Sonne unter dem Winkel von 1 Bogensekunde ($1'' = 1/3 600^\circ$) erscheint. Es gilt: $1 \text{ pc} = 206 265 \text{ AE}$.

Für die Berechnung einer Entfernung r aus einem Parallaxenwinkel p gilt:
 $r = 1/p$

In dieser Gleichung kommt zum Ausdruck, dass bei kleiner werdender Parallaxe die Entfernung des Objektes größer wird, r und p also indirekt proportional zueinander sind.

In der nebenstehenden Tabellen findet man einige Sternentfernungen in Parsec. Man nutze die Zahlenangaben für verschiedene Übungsaufgaben!

Stern	Entfernung in pc
Proxima Centauri	1,30
α Centauri B	1,35
α Centauri A	1,35
Barnards Stern	1,82
Lalande 21185	2,55
Sirius	2,7
Prokyon	3,5
Atair	5,0
Arktur	11
Kapella	14
Rigel	250

Entfernung der fünf erdnächsten und einiger weiterer Sterne

Parallaxenfehler

Wir kommen jetzt zur eigentlichen Themenstellung zurück: Weshalb gibt es immer wieder wissenschaftliche Debatten über die Genauigkeit von astronomischen Entfernungsangaben? Wieso lassen sich keine exakten Entfernungen nennen?

Die Antworten auf diese Fragen hängen freilich immer vom konkreten Sachverhalt ab, ganz allgemein lässt sich aber an ihnen eine Diskussion über das Problem der Messfehler anknüpfen. Auch wenn die mathematischen Kenntnisse für eine statistische Fehlerdiskussion im Schulunterricht kaum bereit gestellt werden können, kann man Fehlerarten erörtern und durch verschiedene graphische Methoden auf die Auswirkungen dieser Fehler hinweisen.

Wir wählen nachfolgend das Beispiel der Winkelmessungen des Satelliten Hipparcos.

Hipparcos hat trigonometrische Parallaxen von Einzelsternen mit einer mittleren Genauigkeit von $0,002''$ gemessen. Das heißt, für einen einzelnen Stern der Parallaxe p liegt der wahre Parallaxenwert (natürlich nur im Mittel und mit statistischer Wahrscheinlichkeit, zumeist von rund 70 %) im Bereich von $(p \pm 0,002)''$.

Um den dadurch verursachten Entfernungsfehler für r übersichtlich zu veranschaulichen, zeichne man ein r - p -Diagramm, in das man die Funktionen

$$r = \frac{1}{p}, r = \frac{1}{p + 0,002''}, r = \frac{1}{p - (0,002'')}$$

durch die Schüler (als Übungsaufgabe) eintragen lässt (Abb. 4).

Im blau gekennzeichneten Bereich kann das zu einer bestimmten Parallaxe gehörende Fehlerintervall für die Entfernung abgelesen werden. So liegt ein Stern mit $p = (0,020 \pm 0,002)''$ mit großer Wahrscheinlichkeit im Entfernungsintervall zwischen $r = 45,5$ pc und $r = 55,6$ pc, ein Stern mit $p = (0,006 \pm 0,002)''$ ist im Bereich $r = 125$ pc und $r = 250$ pc anzutreffen und eine Parallaxe von nur $0,002''$ könnte voll und ganz durch Messfehler verursacht sein. Das Objekt könnte dann sogar – jedenfalls aufgrund der geometrischen Information – auch die trigonometrische Parallaxe $0''$ besitzen, also unendlich weit von der Erde entfernt sein. Trotz der hohen Messgenauigkeit kann man für einen einzelnen Stern bei größeren Entfernungen keine sicheren Distanzen mehr berechnen. Bezieht man in seine Überlegungen aber mehrere Sterne ein (beispielsweise Angehörige eines Sternhaufens, von denen man annehmen kann, dass sie etwa alle die gleiche Entfernung zur Erde haben), dann kann man durch statistische Auswertung den Fehler zwar um ein gewisses Maß verringern, aber nie beseitigen.

Diagramm der Parallaxenfehler

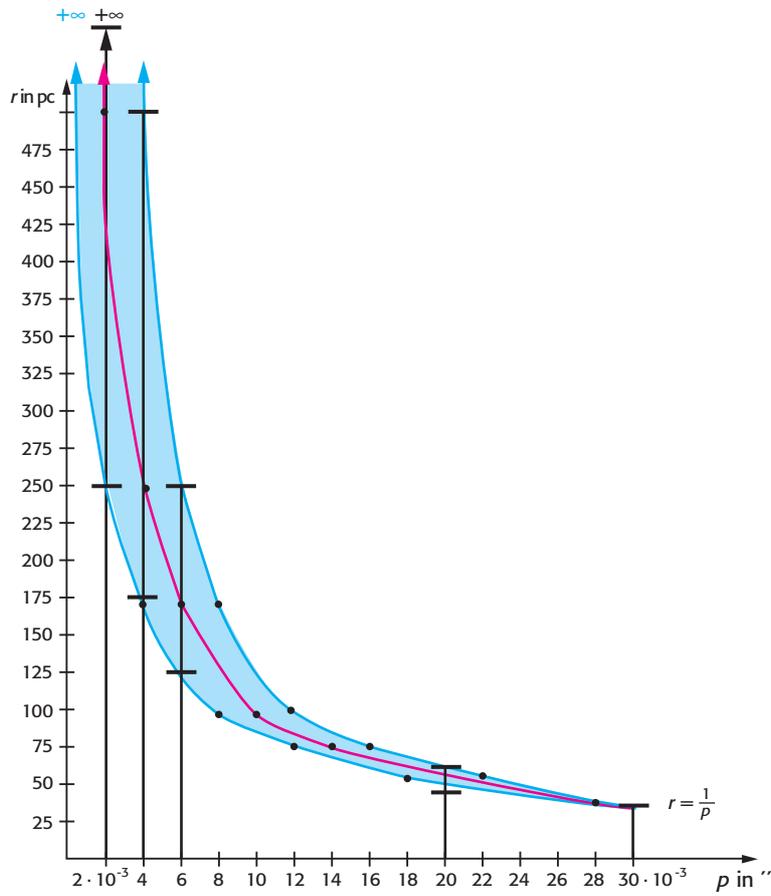


Abb. 4

Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen

Abbildung 1: Eigene Zeichnung

Abbildung 2: Eigene Zeichnung

Abbildung 3: Astronomie Gymnasiale Oberstufe-Grundstudium, Paetec-Duden, S. 145
ISBN: 978-3-89517-798-9

Abbildung 4: Eigene Zeichnung