

Mechanik mit System

Unterstützung der Unterscheidung von
Wechselwirkungsgesetz und Kräftegleichgewicht mittels
der Methode des Freischneidens

Julia Wöllermann

19.09.2019

„Schüler meinen:

**„Kraft und Gegenkraft greifen am
gleichen Körper an.“** (Schecker et al. 2018, S. 78)

Hintergrund

Verwechslung von Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz

- Actio und Reactio greifen am gleichen Körper an
(Warren 1979; Viennot 1979; Jung 1981; Schecker et al. 2018)
- Schüler verstehen nicht, dass eine Interaktion zwei Kräfte erfordert und dass diese an zwei Körpern angreifen
(Arons 1981)
- Actio muss größer als Reactio sein, damit Bewegung zustande kommt (Viennot 1979)
- Actio zeitlich vor Reactio (Schecker et al. 2018, S. 78)

Hintergrund

Kerncurriculum:

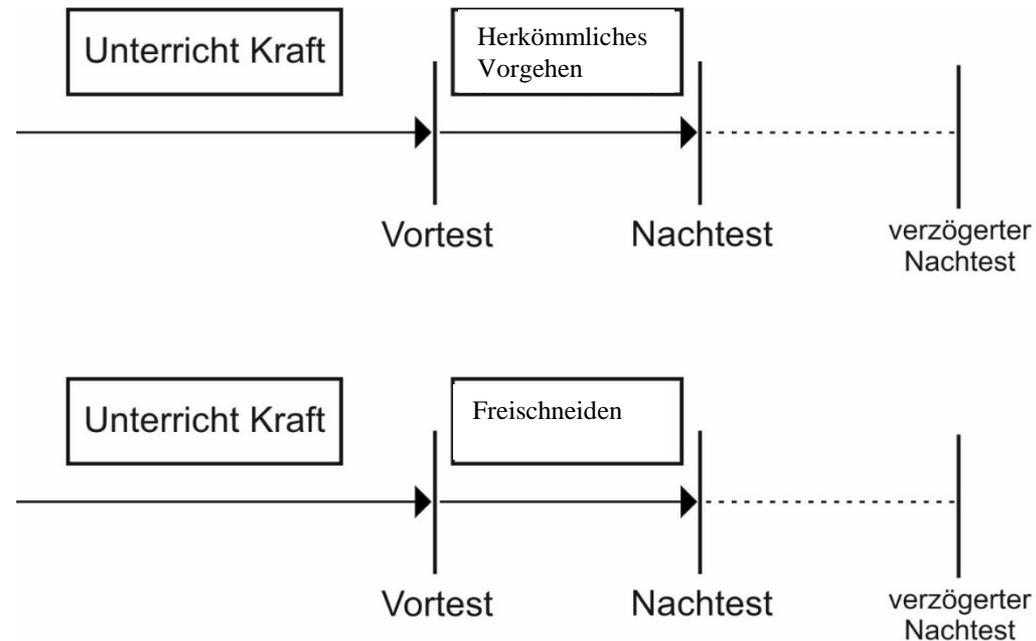
„Die Schülerinnen und Schüler [...] unterscheiden zwischen Kräftepaaren bei der Wechselwirkung an zwei Körpern und Kräftepaaren beim Kräftegleichgewicht an einem Körper.“

(Niedersächsisches Kultusministerium 2015, S. 28)

Hintergrund

Studie

- Vergleich von eher herkömmlichem Vorgehen mit der Methode des Freischneidens



Hintergrund

Studie

Themenbereich Mechanik

(Doppeljahrgang 7/8)

Am Ende von Schuljahrgang 8

Die Schülerinnen und Schüler ...

- verwenden lineare t - s - und t - v -Diagramme zur Beschreibung geradliniger Bewegungen.
- erläutern die zugehörigen Gleichungen.
- nutzen diese Kenntnisse zur Lösung einfacher Aufgaben.
- erläutern die Trägheit von Körpern und beschreiben deren Masse als gemeinsames Maß für ihre Trägheit und Schwere.
- verwenden als Maßeinheit der Masse 1 kg und schätzen typische Größenordnungen ab.
- identifizieren Kräfte als Ursache von Bewegungsänderungen / Verformungen oder von Energieänderungen.
- verwenden als Maßeinheit der Kraft 1 N und schätzen typische Größenordnungen ab.
- unterscheiden zwischen Kraft und Energie
- geben das hookesche Gesetz an.
- unterscheiden zwischen Gewichtskraft und Masse (Ortsfaktor g).
- stellen Kräfte als gerichtete Größen mithilfe von Pfeilen dar.
- bestimmen die Ersatzkraft zweier Kräfte zeichnerisch.
- unterscheiden zwischen Kräftepaaren bei der Wechselwirkung zwischen zwei Körpern und Kräftepaaren beim Kräftegleichgewicht an einem Körper.

Hintergrund

Studie

Stunde	Thema
1	Einführung Kraft
2	Einfluss der Masse
3	Krafteinwirkung über längere Zeiträume und Kraftpfeil
4	Festigung des bisher Gelernten
5	Wechselwirkungsgesetz: Ein Prinzip für alle Situationen
6	Wechselwirkungsgesetz: Stationsarbeit
7	Wechselwirkungsgesetz: Stationsarbeit besprechen
8	Resultierende Kraft
9	Resultierende Kraft: Spezialfall Kräftegleichgewicht
10	Kräftegleichgewicht: Ruhe & konstantes Tempo

Unterricht Kraft

Einführung Kraft

ungünstig

- Kraft als selbstständige Entität (Schecker 1985, S. 380, Tobias 2010)
- Kraft als Eigenschaft eines Körpers (Schecker 1985, S. 188, Driver & Squires 1994)
- Begriff „wirken“ im Alltag: (Wodzinski 1996, S. 266)
 - Medikament wirkt / Bild an der Wand wirkt /...
 - Subjekt ist Ursache der Wirkung

Unterricht Kraft

Einführung Kraft

Wodzinski (1996, S. 57, S. 267):

„Kräfte werden ausgeübt“

- Impliziert beide Wechselwirkungspartner
- Anwendung bei „passiven“ Körpern erfolgt problemlos

Unterricht Kraft

Einführung Kraft

Sprechweise:

Ein Körper übt eine Kraft auf einen zweiten Körper aus.

Mark schießt einen Elfmeter.

Mark übt (mit seinem Fuß) eine Kraft auf den Ball aus.

Inga übt (mit dem Fuß) eine Kraft auf den Startblock aus.

Inga drückt sich am Startblock ab.

Der Apfel fällt vom Baum.

Die Erde übt eine Kraft auf den Apfel aus.

Jürgen übt eine Kraft auf den Schwamm aus.

Jürgen wringt den Schwamm aus.

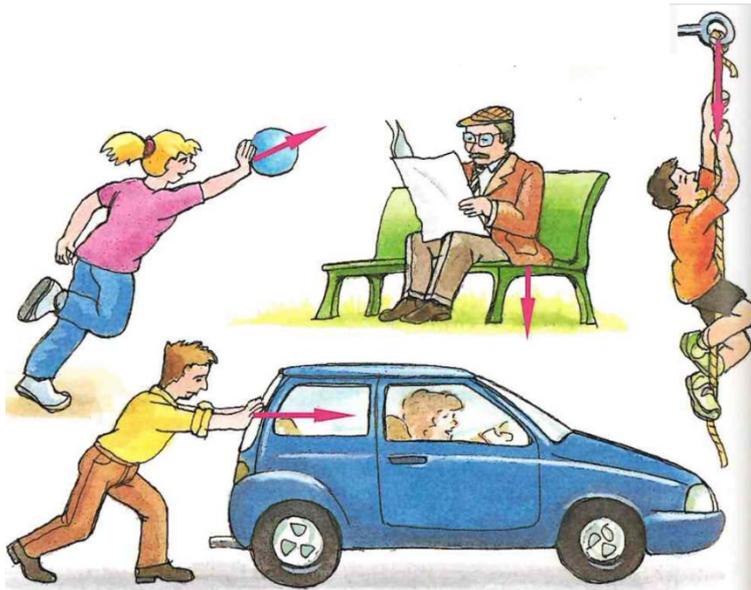
Das Pferd zieht die Kutsche.

Das Pferd übt eine Kraft auf die Kutsche aus.

Unterricht Kraft

Kraftpfeil

- Angriffspunkt
Üblicherweise an Angriffsfläche oder im Schwerpunkt



Spektrum Physik 7/8



Unterricht Kraft

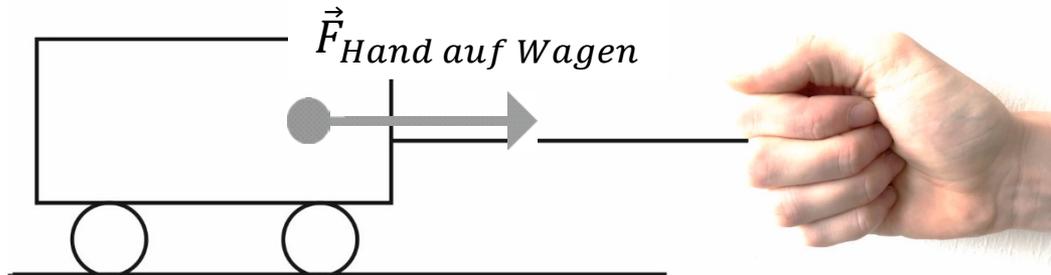
Kraftpfeil

- Beschriftung
 - $\vec{F}_{\text{Körper}}$ unvollständig
 - $\vec{F}_{\text{Körper1 Körper2}}$ nicht eindeutig
- Verschriftlichung der Sprechweise
„Ein Körper übt eine Kraft auf einen zweiten Körper aus“

Unterricht Kraft

Kraftpfeil

- Angriffspunkt im Körper verschiebbar
- $\vec{F}_{\text{Körper1 auf Körper2}}$



Unterricht Kraft

Festigung des bisher Gelernten

Kooperatives Quiz (Mazur 2017, S. 10)

1. Fragestellung
 2. Alleine Antwort überlegen,
Antwort notieren
 3. Mit Sitznachbarn über eigene Antwort diskutieren,
(revidierte) Antwort notieren
 4. Rückmeldung der Antworten an Dozenten
 5. Erläuterungen zur richtigen Antwort
- Zunahme an Sicherheit
 - Anteil richtiger Lösungen nimmt zu
 - Diskussion in Fachsprache

Unterricht Kraft

Festigung des bisher Gelernten

- kooperatives Quiz nach Mazur



Unterricht Kraft

Festigung des bisher Gelernten



Footage courtesy of ESA - European Space Agency

Der Film zeigt einen Astronauten, der zwei Bälle pustet.

A: Die gleiche Kraft hat auf Körper mit unterschiedlicher Masse unterschiedliche Wirkung.

B: Auf die Körper werden unterschiedliche Kräfte ausgeübt, weil sie verschieden stark ihre Bewegung ändern.

C: Bei gleicher Kraft ist die Bewegungsänderung größer, je größer die Masse ist.

D: Je größer die Kraft ist, desto größer ist die Masse.

Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

- Deduktives Vorgehen
- Explizite Thematisierung von SuS-Vorstellungen
Aktivitätsschema, z. B.
„Nur aktive Körper können Kräfte ausüben, passive leisten Widerstand.“ (Schecker et al. 2018, S. 78)
- Nature of Science (bspw. Heering & Kremer 2018)
 - Reflexion über das Vorgehen der Physik
 - Explizierung des Nutzens

Pedro drückt Alexander nach hinten. Gleichzeitig spürt Pedro die Kraft von Alexander.



Pedro übt eine Kraft auf Alexander nach rechts aus. Gleichzeitig übt aber auch Alexander eine Kraft auf Pedro nach links aus.



Der Ball stößt die Person an. Daher bewegt sich die Person nach links.



Der Ball übt eine Kraft auf die Person nach links aus. Gleichzeitig übt aber auch die Person eine Kraft auf den Ball nach rechts aus.



Die Räder des Autos schieben durch die Drehung die Fahrbahnmarkierung nach hinten.



McFarland, E. in: Müller, R. (2009): Klassische Mechanik, DeGruyter, Berlin.

Das Auto übt eine Kraft auf die Straße nach links aus. Gleichzeitig übt aber auch die Straße eine Kraft auf das Auto nach rechts aus.



Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

- Ein Prinzip für alle Situationen.

Fazit

- Die Physik sucht nach möglichst allgemeinen Gesetzen, die sich auch dann anwenden lassen, wenn die konkreten Beispiele unterschiedlich aussehen.
- Die physikalischen Gesetze können von der Alltagsanschauung abweichen.
- Auch wenn sie manchmal unanschaulich wirken, sind die physikalischen Gesetze wertvoll, weil durch ihre Allgemeinheit auch Vorhersagen über noch unbekannte Abläufe gemacht werden können.

Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

- „Actio gleich Reactio“ (vgl. Schecker et al. 2018, S. 78)
 - Zeitliche Abfolge
 - Kausale Abfolge
 - „Kraft gleich Gegenkraft“ (vgl. Schecker et al. 2018, S. 78)
Inneres Sträuben eines Körpers gegen von außen angreifende Kraft
- „Die Kraft ist ein Zwillingsspaar“ (Backhaus 2001)
Aufmerksamkeit auf beiderseitige Bewegungsänderungen lenken

Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

- Ein Prinzip für alle Situationen.
- Begriff „Zwillingskräfte“

Kräfte treten **immer** als „Zwillingspaare“ auf.

Wenn ein Körper auf einen zweiten eine Kraft ausübt, so übt auch der zweite auf den ersten eine Kraft aus. Die beiden Kräfte sind

- gleich groß (Pfeile also gleich lang) und
- genau entgegengesetzt gerichtet.

Die Zwillingskräfte sind auch dann gleich groß, wenn die Masse der beteiligten Körper unterschiedlich groß ist. Die Körper zeigen dann unterschiedliche Wirkung.

Die Zwillingskräfte **greifen** immer **an unterschiedlichen**, niemals am gleichen **Körper an**. Man nennt die beiden Körper auch **Wechselwirkungspartner**, weil beide Körper in Wechselwirkung treten.

Unterricht Kraft

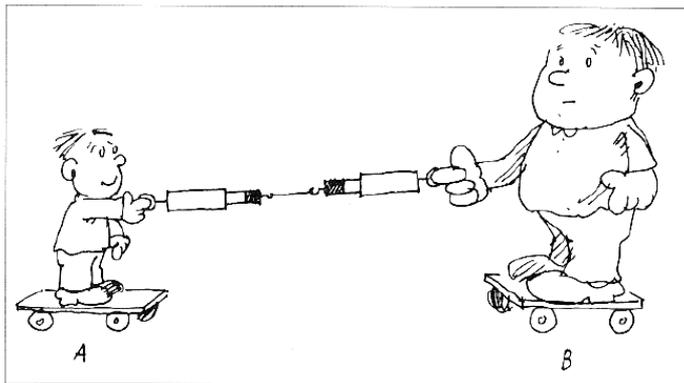
Wechselwirkungsgesetz

- Akzeptanz des gleichen Betrags
 - „Wenn ein LKW und ein PKW zusammenstoßen, übt [...] der große, schwere LKW eine größere Kraft aus als der kleine PKW“ (Schecker et al. 2018, S. 73)
 - Aktivitätsschema
„Nur aktive Körper können Kräfte ausüben, passive leisten Widerstand.“ (Schecker et al. 2018, S. 78)
 - „Im Test würde ich die richtige Antwort ankreuzen, aber ich glaube nicht, dass das wirklich so ist.“ (vgl. Gettrust 2001, S. 392)

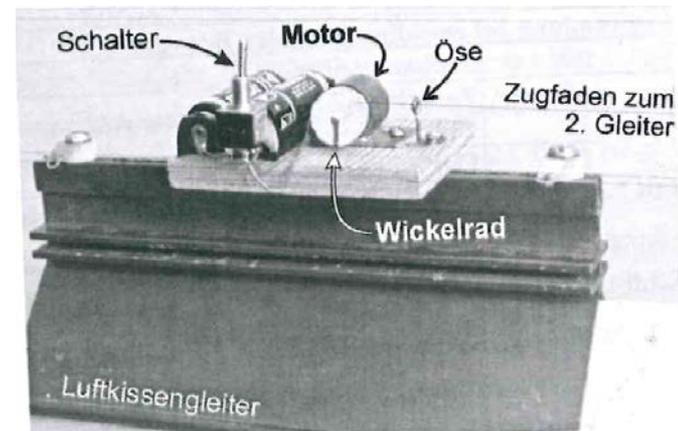
Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

- Akzeptanz des gleichen Betrags
 - Viele Versuche nur anschaulich
(vgl. Hilscher et al. 2006, S. 26–41; Feldman 2011 oder Higsberger 1977, S. 55)
 - Messungen hauptsächlich bei Abwandlungen des Skateboard-Versuches (vgl. Muckenfuß 1988; Wilhelm 2005)



Muckenfuß 1988, S. 19

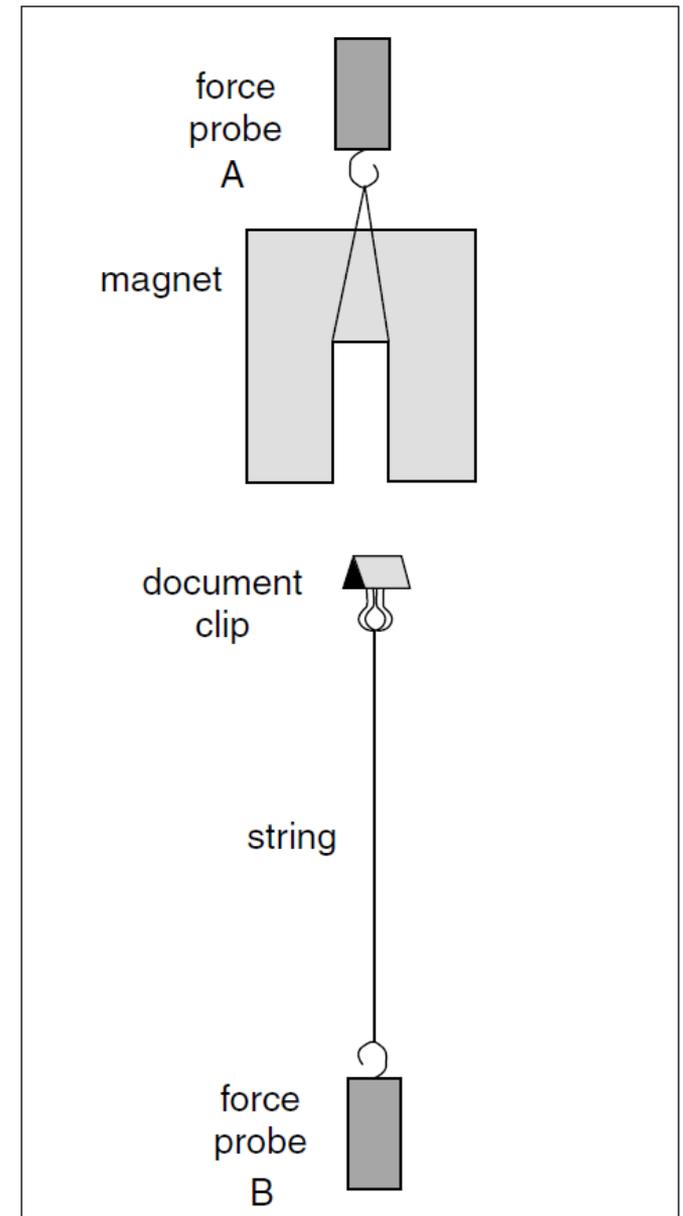


Wilhelm 2005, S. 122

Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

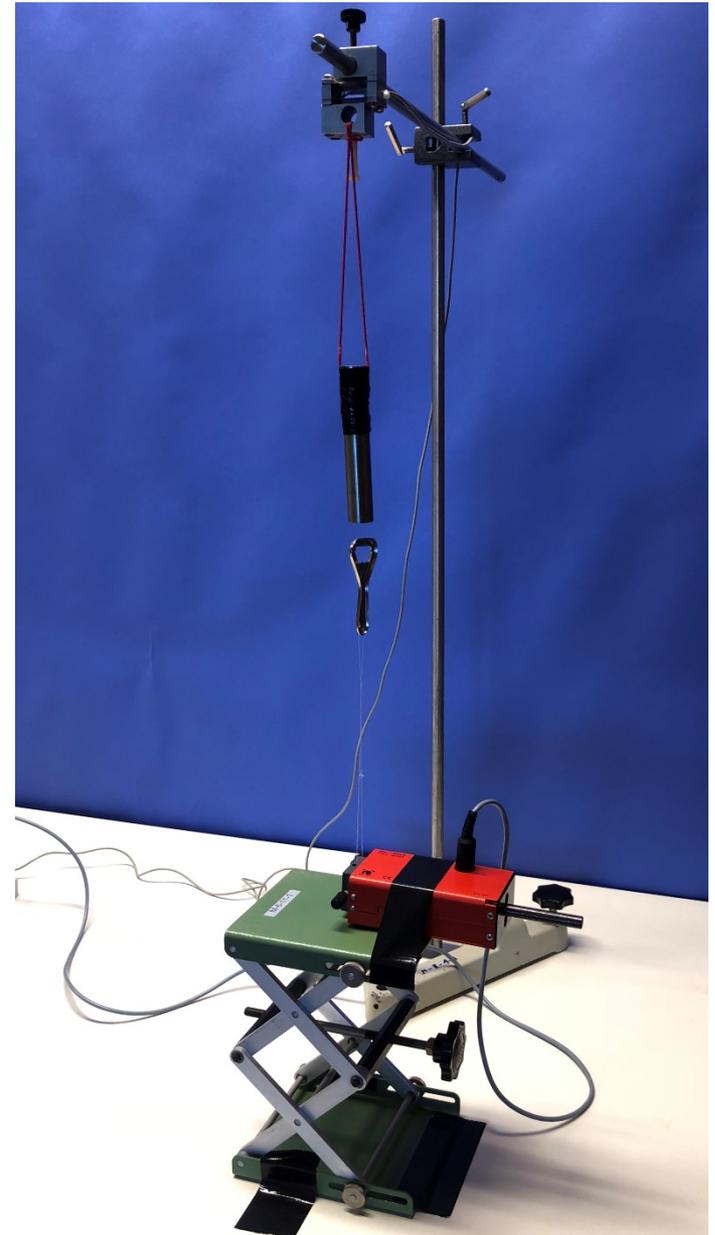
- Akzeptanz des gleichen Betrags
 - Asymmetrische Situation:
 - Masse
 - Aktivität
 - Akzeptanzbefragung Gelhoet (2019, s. Materialbörse)



Unterricht Kraft

Wechselwirkungsgesetz

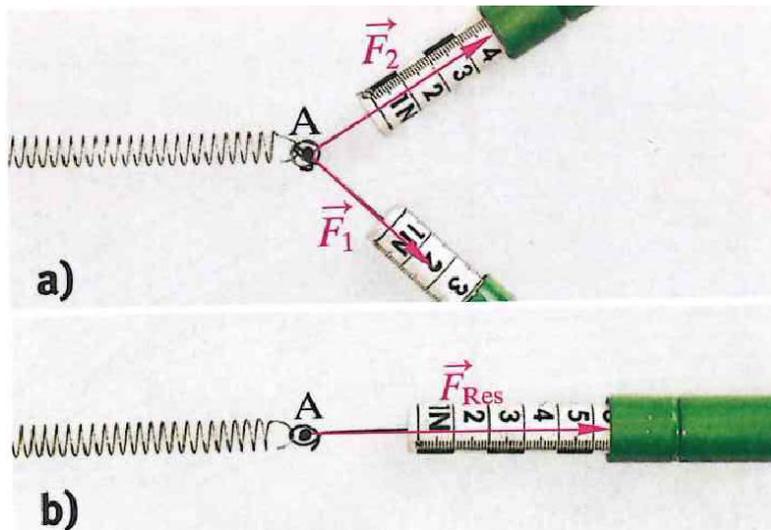
- Ein Prinzip für alle Situationen.
- Begriff „Zwillingskräfte“
- Magnetversuch



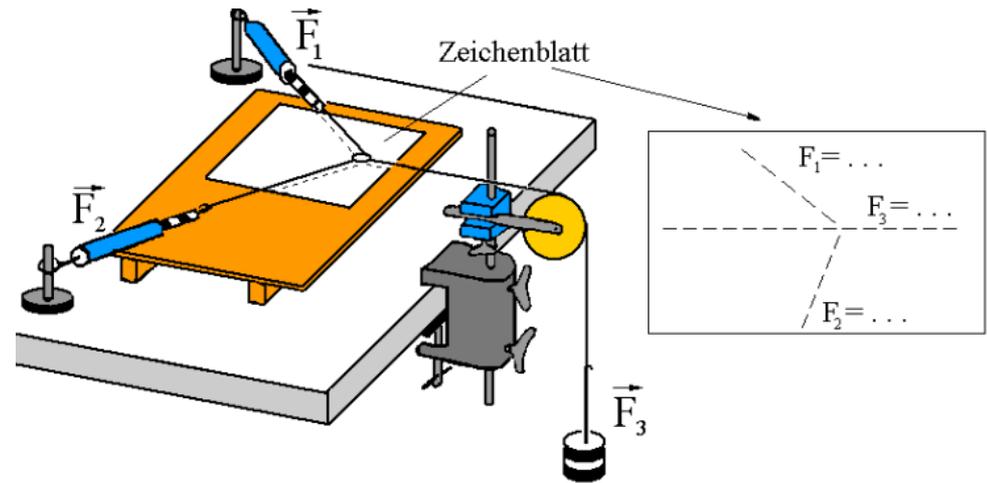
Unterricht Kraft

Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

Übliches Vorgehen:



Bader & Dorn 2008

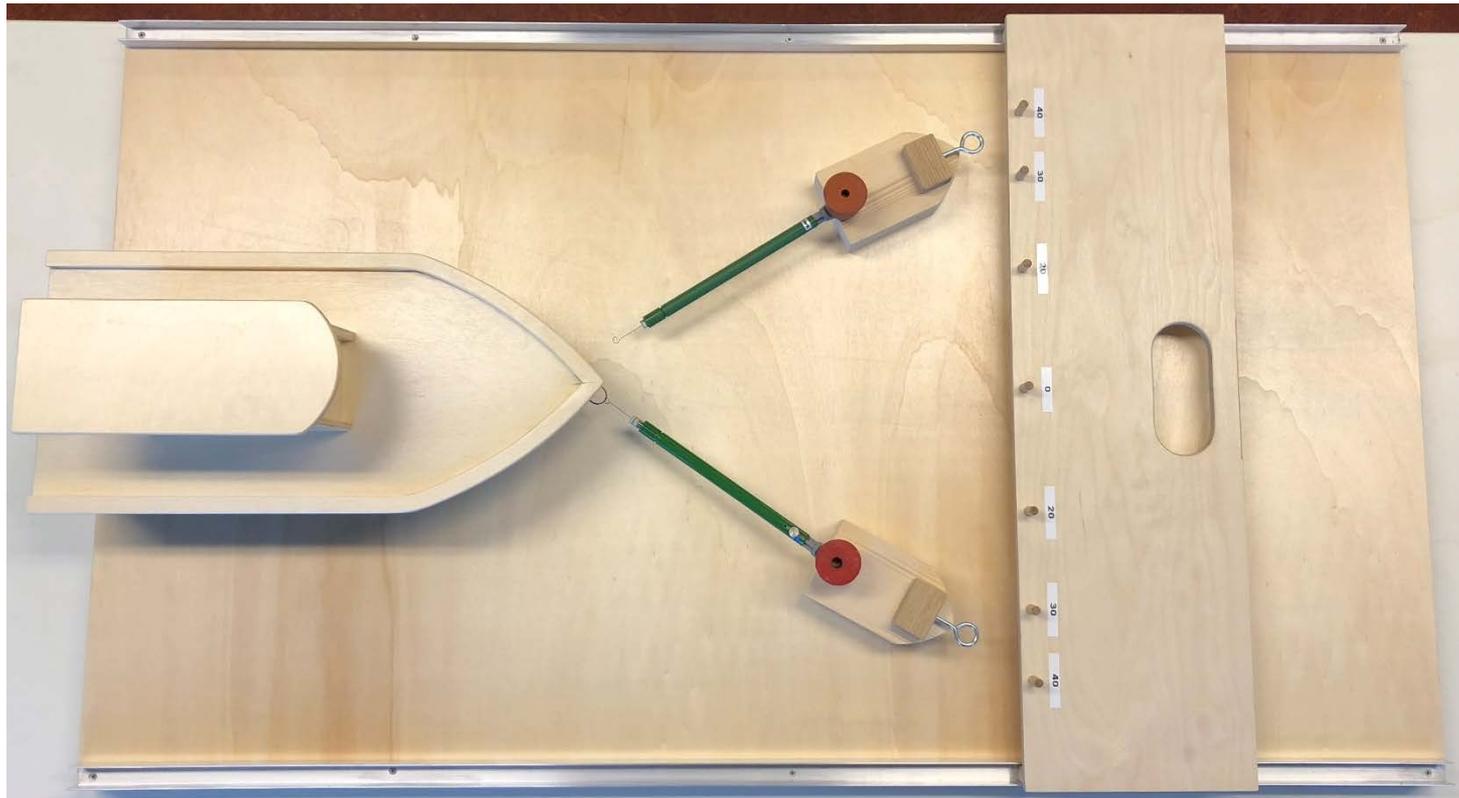


Joachim Herz Stiftung 2019

Unterricht Kraft

Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

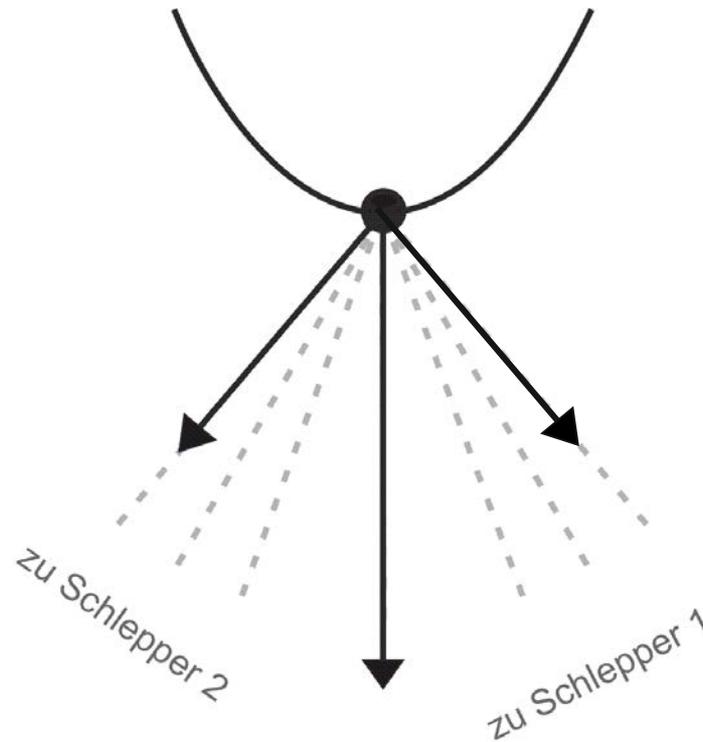
- Schiffsversuch



Unterricht Kraft

Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

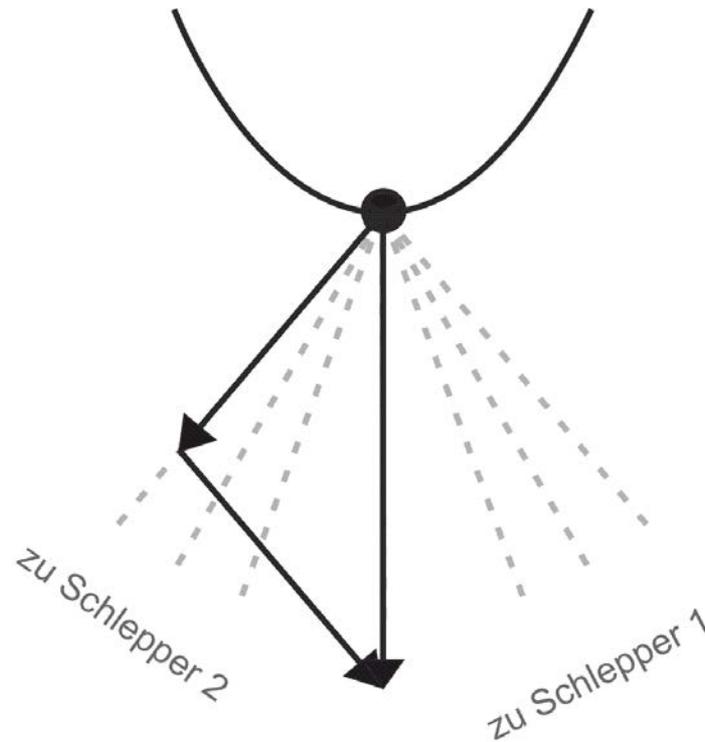
- Schiffsversuch



Unterricht Kraft

Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

- Schiffsversuch



Unterricht Kraft

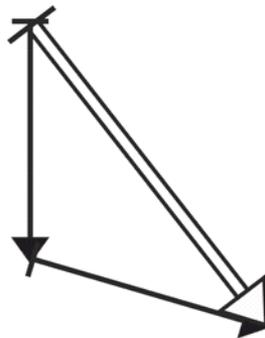
Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

- Resultierende Kraft als Doppelpfeil
 - Schüler unterscheiden nicht zwischen der resultierenden Kraft und den speziellen Einzelkräften (Schecker et al. 2018, S. 77)
 - Resultierende Kraft von Einzelkräften optisch abheben: Farbe, gestrichelte Linien (Warren 1979, S. 10) oder Doppelpfeil (Van den Berg 1998, S. 222)

Unterricht Kraft

Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

- Schiffsversuch
- Resultierende Kraft als Doppelpfeil



Unterricht Kraft

Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

- Kräftegleichgewicht bei konstantem Tempo

Schüler:

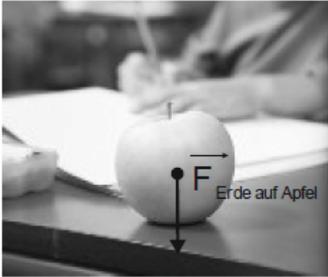
Wenn eine Kraft (bspw. auch zwei Kräfte beim Kräftegleichgewicht) wirkt, ändert der Körper seinen Bewegungszustand. (Schecker 2018, S. 76)

Unterricht Kraft

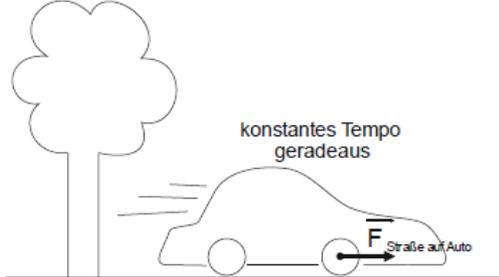
Resultierende Kraft und Kräftegleichgewicht

- Schiffsversuch
- Resultierende Kraft als Doppelpfeil
- Kräftegleichgewicht in Ruhe und bei konst. Tempo

Kräftegleichgewicht – ein Spezialfall der resultierenden Kraft



Ein Apfel liegt in Ruhe auf dem Tisch.
Wie wir wissen, übt die Erde eine Kraft auf den Apfel aus, nämlich die Gewichtskraft (oder Gravitationskraft): $\vec{F}_{\text{Erde auf Apfel}}$



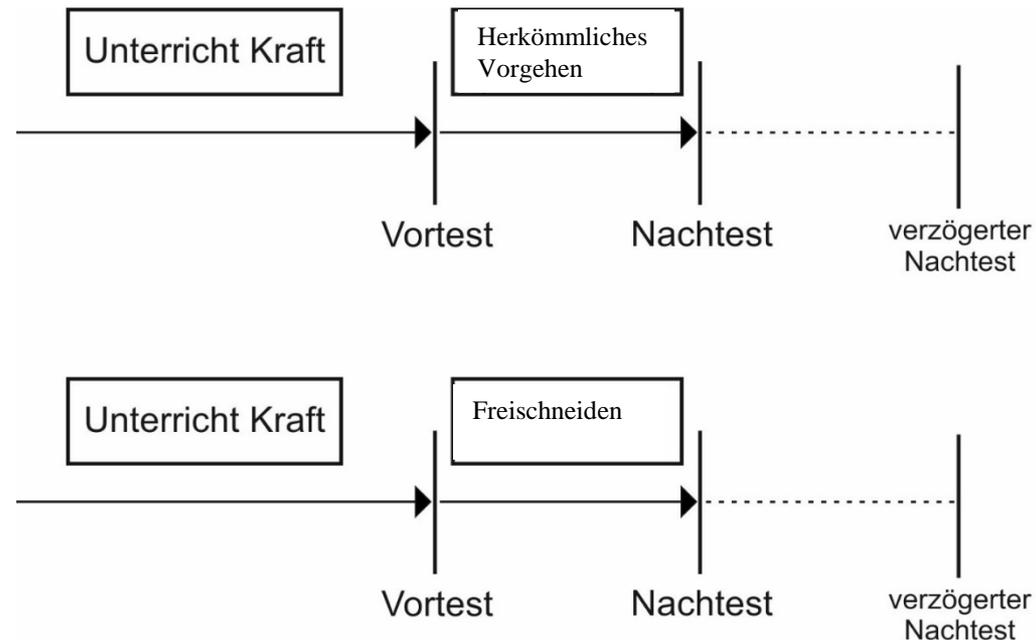
Ein Auto fährt mit konstantem Tempo geradeaus.
Wie wir wissen, übt die Straße eine Kraft auf das Auto aus, sie „schiebt“ das Auto „an“:
 $\vec{F}_{\text{Straße auf Auto}}$

Unterstützungsmaßnahmen

Unterstützungsmaßnahmen

Studie

Ist die Methode des Freischneidens dem eher herkömmlichen Vorgehen ebenbürtig?



Unterstützungsmaßnahmen

Warum Freischneiden?

- Getrennte Skizzen für beteiligte Körper verdeutlichen, dass die Wechselwirkungskräfte an verschiedenen Körpern angreifen (Schecker 2018, S. 78)
- In Ingenieurwissenschaften und im englischsprachigen Raum im Kontext Schule verbreitet (z. B. Böge 2013; IQWST 2013)
- Erweiterung auf Themenbereich Energie denkbar (Müller 2009, S. 170 ff; 2. Vortrag)

Unterstützungsmaßnahmen

Studie

Ist die Methode des Freischneidens dem eher herkömmlichen Vorgehen ebenbürtig?

Herkömmliches Vorgehen:

Kontrastierung

+

Umrandungsauswahl

Unser Vorgehen:

Kontrastierung

+

Freischneiden

Unterstützungsmaßnahmen

Kontrastierung

Unterstützungsmaßnahmen

Kontrastierung

- Schüler registrieren beim Kräftegleichgewicht und Wechselwirkungsgesetz nur die Gleichheit des Betrags und die entgegengesetzte Richtung (Turner 2003, S. 404)
- Gegenüberstellung rückt Kriterien der Unterscheidung in den Fokus (Oser & Spychiger 2005, S. 11; Rittle-Johnson & Star 2011)
- Vergleich muss gefordert werden, sonst nicht ausreichend durchgeführt (Renkl 2016)
- Bleibt länger im Gedächtnis (Ziegler, Stern 2014)

Kontrastierung

von Zwillingskräften und Kräftegleichgewicht

Ergänze die Tabelle, um Zwillingskräfte und das Kräftegleichgewicht zu unterscheiden.

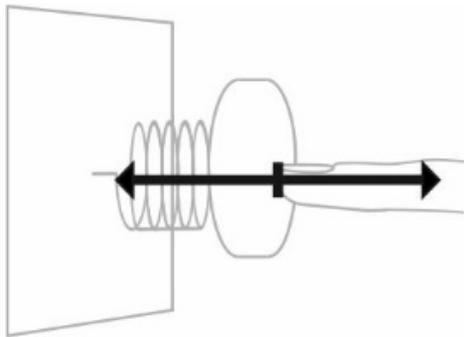
		Zwillingskräfte	Kräftegleichgewicht
Wie viele Kräfte sind beteiligt?		2	mindestens 2
Wenn beim Kräftegleichgewicht zwei Kräfte beteiligt sind:	Welche Richtung haben die beiden Kräfte?	Die beiden Kräfte sind entgegengesetzt gerichtet.	
	Welche Stärke haben die beiden Kräfte?	Die beiden Kräfte sind gleich groß.	
	Wo befindet sich der Angriffspunkt der beiden Kräfte?	An verschiedenen Körpern. (An jedem der beteiligten Körper greift jeweils eine Kraft an.)	Am selben Körper.
	Welche Wirkung haben die Kräfte auf den Körper?	Die Kräfte beschleunigen jeweils den Körper, an dem sie angreifen.	Der Körper ändert seine Bewegung nicht.

Unterstützungsmaßnahmen

Umrandungsauswahl

Umrandungsauswahl

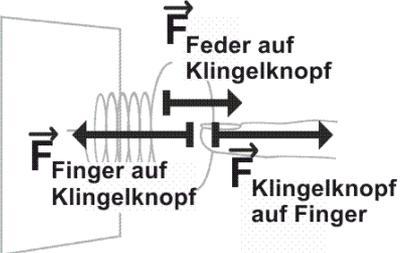
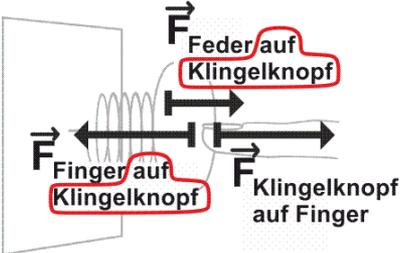
Max drückt eine Klingel. Hannah versucht Max in eine physikalische Falle zu locken:



„Wenn du den Klingelknopf drückst, übst du eine Kraft auf die Klingel aus. Nach dem Wechselwirkungsgesetz übt der Klingelknopf eine Zwillingskraft aus, die genauso groß und entgegengesetzt gerichtet ist. Wenn du stärker drückst, wird auch die Zwillingskraft größer. Aber wenn beide Kräfte gleich groß sind, dann heben sich die Kräfte auf und der Klingelknopf kann sich gar nicht bewegen.“



Umrandungsauswahl

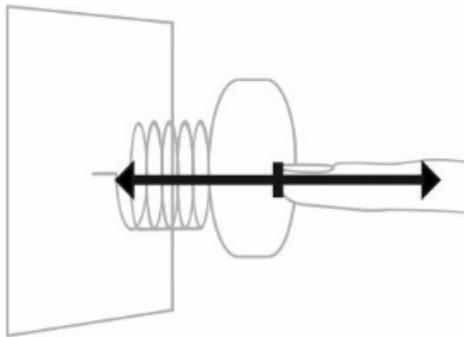
1. Beschriften	2. Umranden	3. Resultierende Kraft bestimmen
 <p>Beschrifte alle Kraftpfeile.</p>	 <p>Durchsuche die Beschriftungen nach den Worten „auf Körper“ und umrande diese Worte.</p>	 <p>Um die resultierende Kraft zu bestimmen, addiere alle Kräfte, deren Beschriftungen umrandet sind.</p>

Unterstützungsmaßnahmen

Freischneiden

Freischneiden

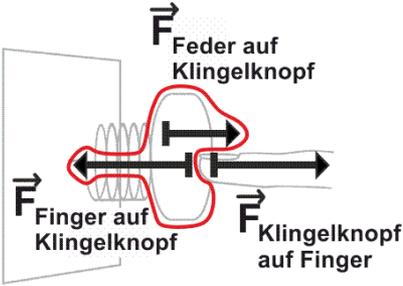
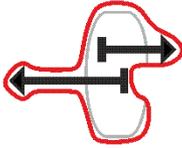
Max drückt eine Klingel. Hannah versucht Max in eine physikalische Falle zu locken:



„Wenn du den Klingelknopf drückst, übst du eine Kraft auf die Klingel aus. Nach dem Wechselwirkungsgesetz übt der Klingelknopf eine Zwillingskraft aus, die genauso groß und entgegengesetzt gerichtet ist. Wenn du stärker drückst, wird auch die Zwillingskraft größer. Aber wenn beide Kräfte gleich groß sind, dann heben sich die Kräfte auf und der Klingelknopf kann sich gar nicht bewegen.“



Freischneiden

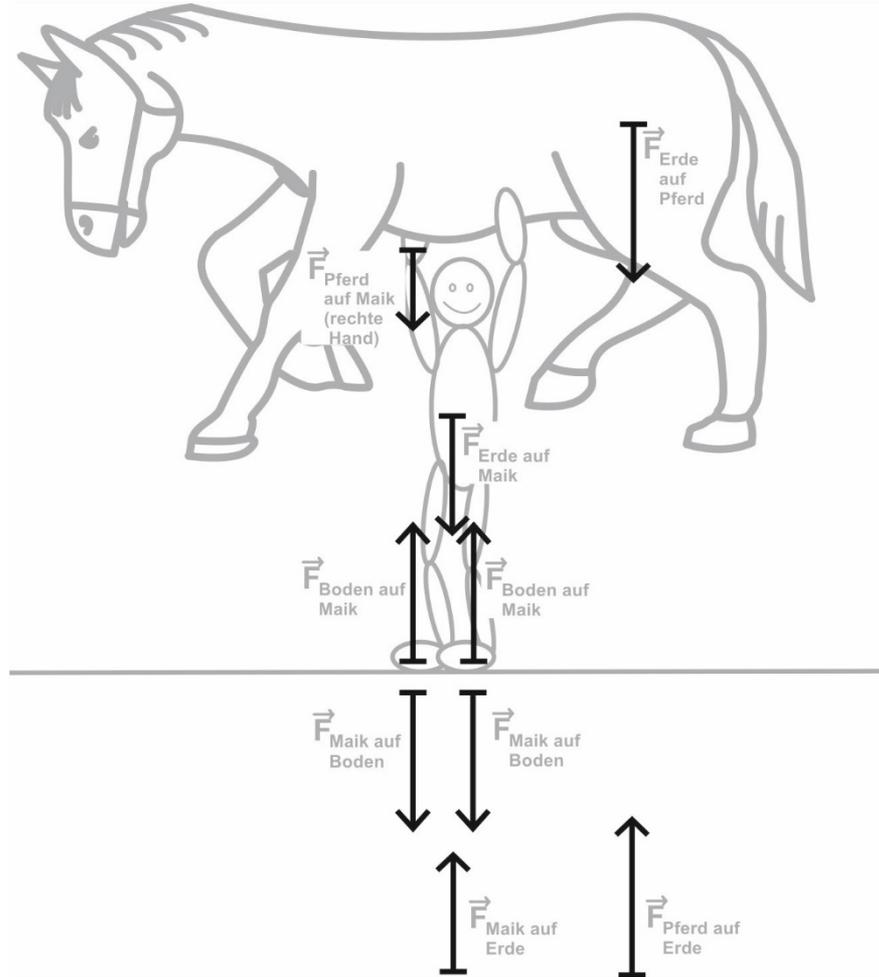
1. Umranden	2. Freischneiden	3. Resultierende Kraft bestimmen
 <p>Umrande den Körper, den du betrachten möchtest.</p> <p>Achte darauf, dass</p> <ul style="list-style-type: none"> • alle Kraftpfeile, die an dem Körper angreifen, innerhalb der Umrandung liegen, • kein Kraftpfeil innerhalb der Umrandung liegt, der nicht an dem Körper angreift. 	 <p>Entferne alle Körper und Kraftpfeile, die außerhalb der Umrandung liegen.</p>	 <p>Um die resultierende Kraft zu bestimmen, addiere alle in der Umrandung liegenden Kräfte.</p>

Unterricht zu den Unterstützungsmaßnahmen

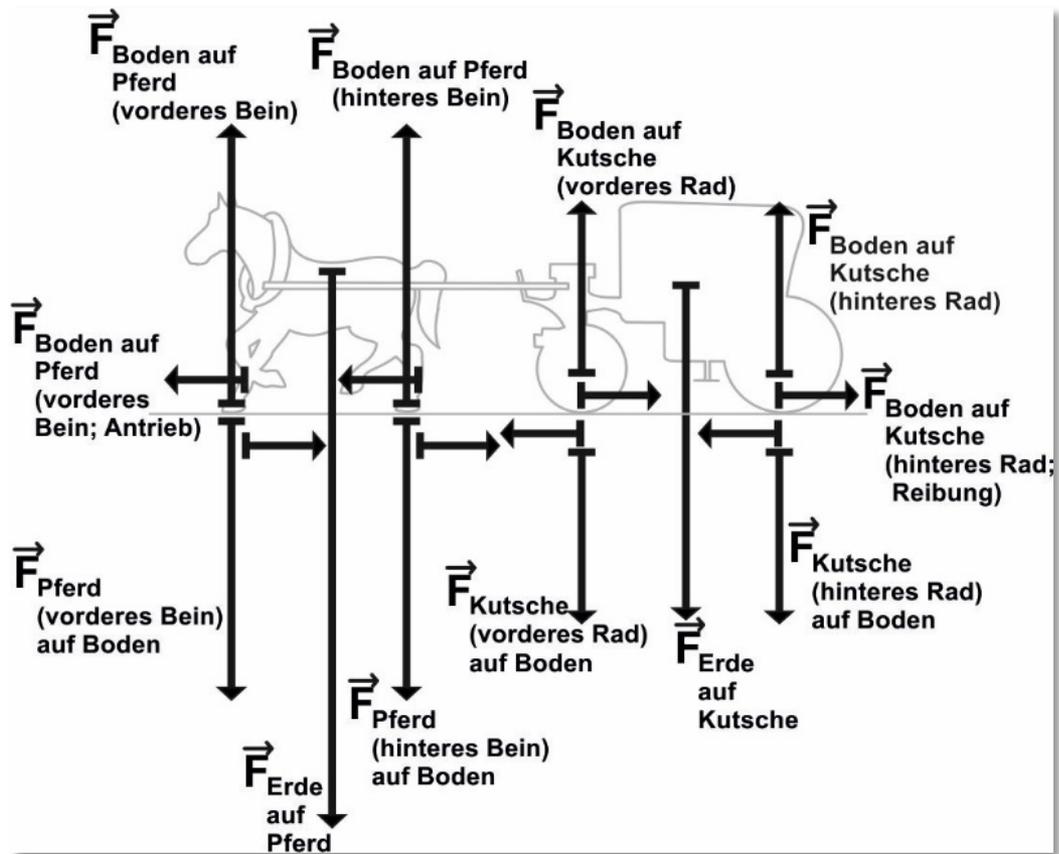
Unterricht zu den Unterstützungsmaßnahmen

	Strang 1	Strang 2	Strang 3
Lehrervortrag	Konflikt	eindimensional	zweidimensional
Ich-Du-Wir			

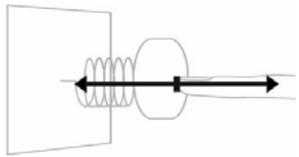
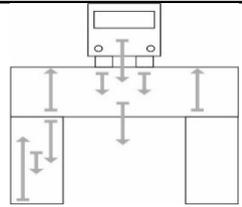
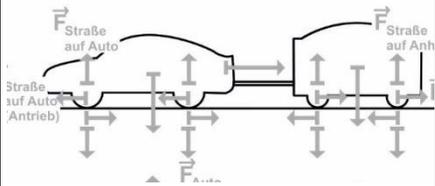
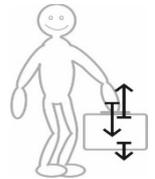
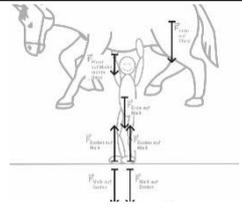
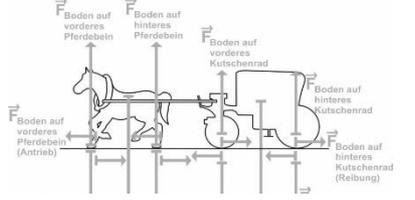
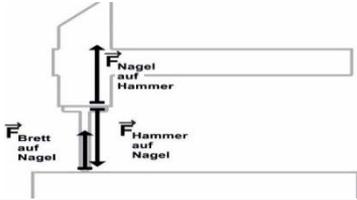
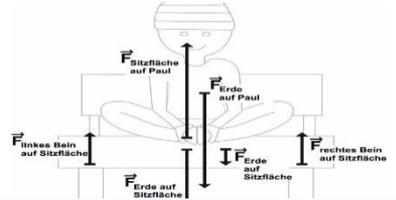
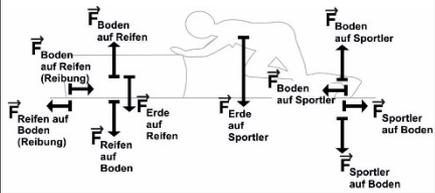
Unterricht zu den Unterstützungsmaßnahmen



Unterricht zu den Unterstützungsmaßnahmen



Unterricht zu den Unterstützungsmaßnahmen

	Strang 1 (Konflikt)	Strang 2 (eindimensional)	Strang 3 (zweidimensional)
Lehrervortrag			
Ich-Du-Wir			
Expertengruppe			

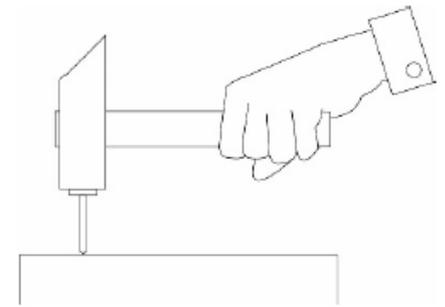


Gruppe 3:

Hammer und Nagel



Eva möchte einen Nagel in ein Brett hämmern. Nina sagt:
 „Egal wie stark du mit dem Hammer auf den Nagel schlägst, der Nagel übt eine gleich große und entgegengesetzt gerichtete Zwillingskraft auf den Hammer aus. Da sich die beiden Kräfte aufheben, kann sich der Nagel nicht bewegen.“
 Eva hämmert auf den Nagel und er bewegt sich trotz Ninas Behauptung.



Aufgaben

1. Markiert Zwillingkräfte.
2. Konstruiert die auf den Nagel ausgeübte resultierende Kraft.

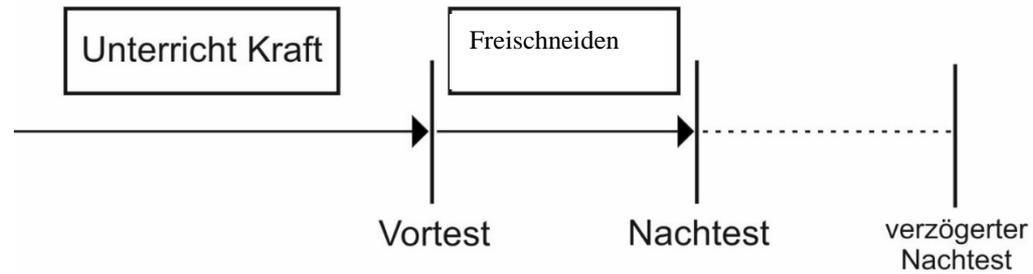
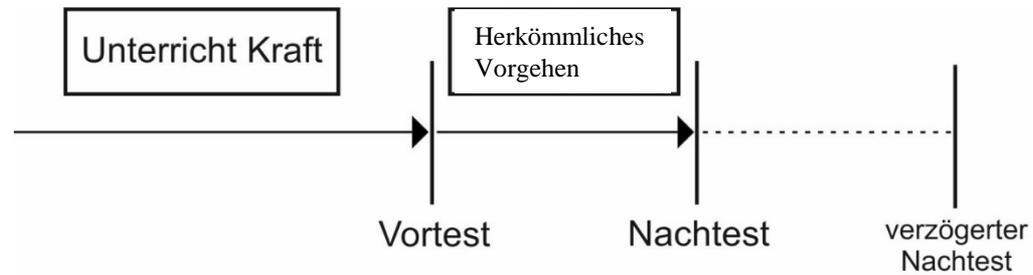
Skizze	Hier ist Platz für deine Notizen
<p>The diagram shows a hammer head above a nail, which is driven into a board. Three force vectors are indicated: $F_{\text{Nagel auf Hammer}}$ (upward arrow from nail to hammer), $F_{\text{Hammer auf Nagel}}$ (downward arrow from hammer to nail), and $F_{\text{Brett auf Nagel}}$ (upward arrow from board to nail).</p>	

3. Nehmt Stellung zu Ninas Behauptung.

Ergebnisse

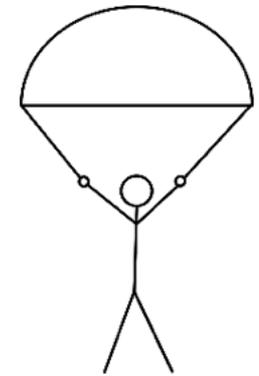
Ergebnisse

Messzeitpunkte



Ergebnisse

Basisaufgaben



Ein Fallschirmspringer fällt mit konstantem Tempo.

Betrachte die Kraft, die die Erde auf den Fallschirmspringer ausübt und die Kraft, die die Luft auf den Fallschirmspringer ausübt.

	richtig	falsch
Die von der Erde ausgeübte Kraft ist <i>genauso groß</i> wie die von der Luft ausgeübte.	●	
Die von der Erde ausgeübte Kraft ist <i>größer</i> als die von der Luft ausgeübte.		●

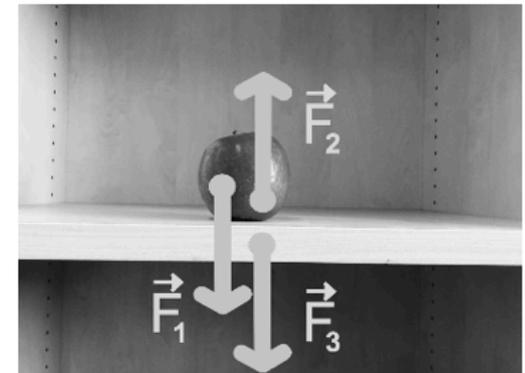
Betrachte nun die Kraft, die die Erde auf den Fallschirmspringer ausübt und die Kraft, die der Fallschirmspringer auf die Erde ausübt.

	richtig	falsch
Die von der Erde ausgeübte Kraft ist <i>genauso groß</i> wie die von dem Fallschirmspringer ausgeübte.	●	
Die von der Erde ausgeübte Kraft ist <i>größer</i> als die von dem Fallschirmspringer ausgeübte.		●

Ergebnisse

Basisaufgaben

Ein Apfel liegt in einem Regal. In der Abbildung rechts ist die Situation mitsamt einiger Kraftpfeile dargestellt.

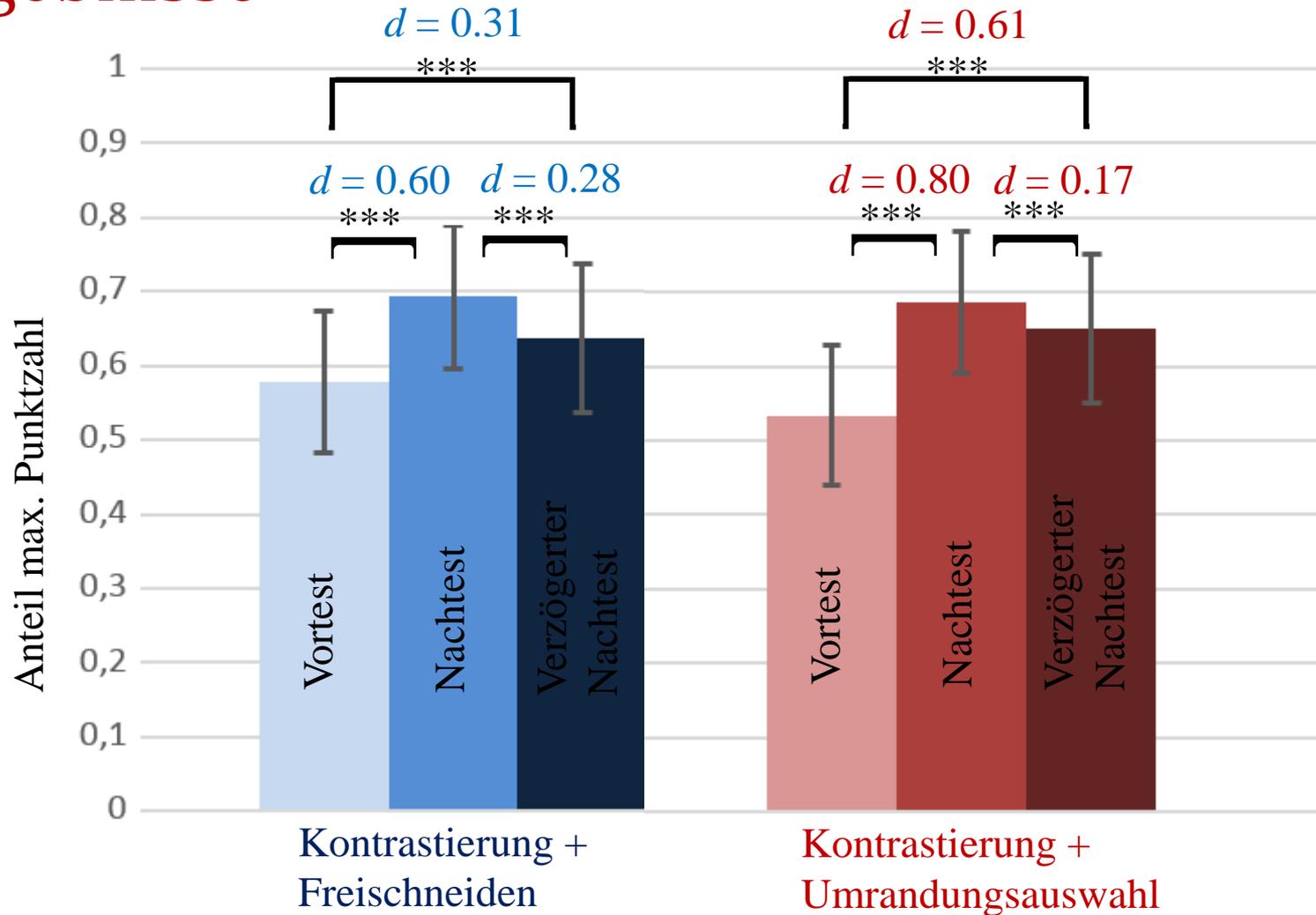


Kreuze an: Folgende Kräfte bilden...

	... ein Kräftegleichgewicht	... Zwillingkräfte	... ein Kräftegleichgewicht und Zwillingkräfte	... weder ein Kräftegleichgewicht noch Zwillingkräfte
\vec{F}_1 und \vec{F}_2	●			
\vec{F}_1 und \vec{F}_3				●
\vec{F}_2 und \vec{F}_3		●		

Ergebnisse

+/- 0,5 Standardabweichungen



Ergebnisse

Transferaufgaben

Orientieren sich an den Aufgaben des Gruppenpuzzles

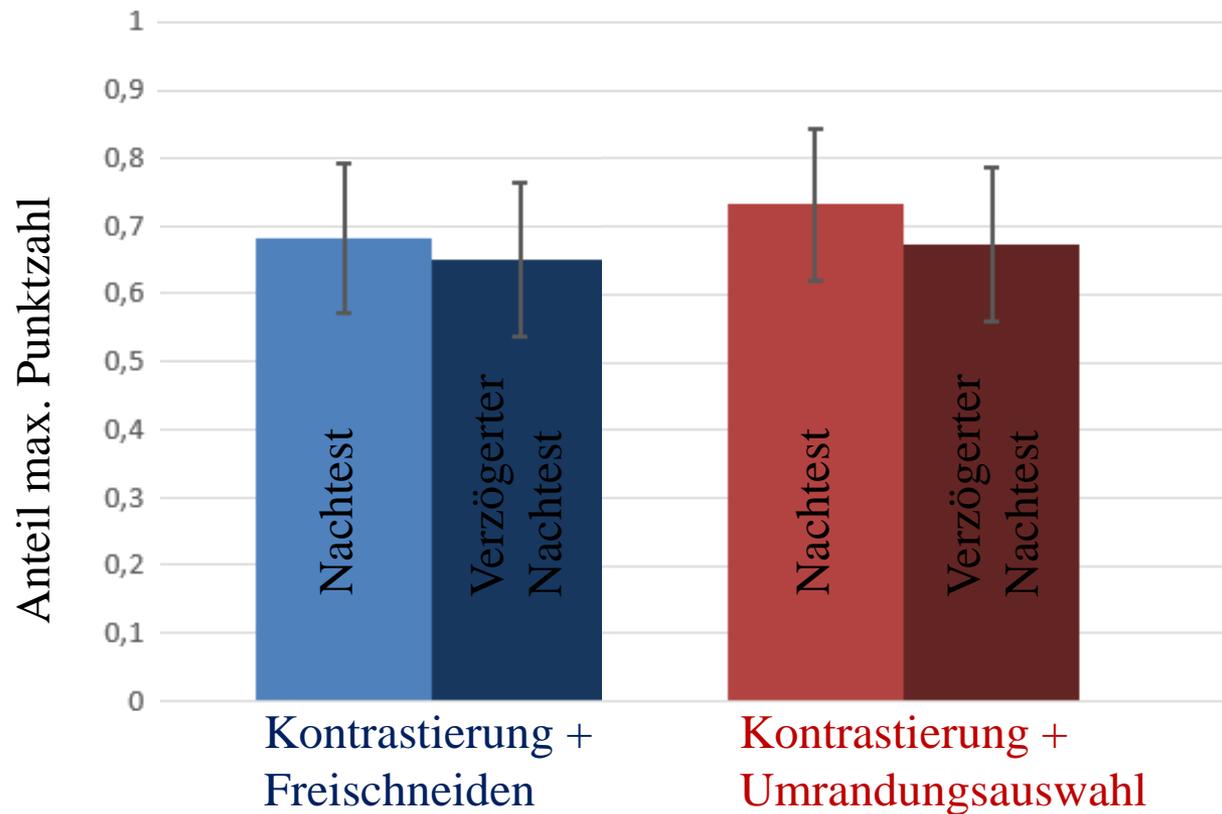
Ergebnisse

	Strang 1 (Konflikt)	Strang 2 (eindimensional)	Strang 3 (zweidimensional)
Lehrervortrag			
Ich-Du-Wir			
Expertengruppe			
Transferaufgabe			

Ergebnisse

Transferaufgaben

+/- 0,5 Standardabweichungen



Link zum Material

www.physikdidaktik.uni-osnabrueck.de

- Material und Angebote
 - Angebote für LehrerInnen
 - Unterrichtsreihen

Literatur

- Backhaus, U. (2001). Die Kraft ist ein Zwillingenpaar. Beispiele zur Einführung des Wechselwirkungsprinzips in der Schule. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 12(65), 12–14.
- Bader, F. & Dorn, F. (2008). *Physik 7/8 Gymnasium Niedersachsen (Gymnasium, Niedersachsen)* (F. Bader & H.-W. Oberholz, Hrsg.). Schroedel.
- Böge, A. (2013). *Technische Mechanik. Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre – Fluidmechanik* (30., überarb. und erw. Aufl.). Lehrbuch. Wiesbaden: Springer.
- Driver, R.; Squires, A.; Rushworth P. & Wood-Robinson, V. (1994). *Making sense of secondary science research into children's ideas*. London: Taylor & Francis Ltd.
- Feldman, G. (2011). Dramatic (and Simple!) Demonstration of Newton's Third Law. *The Physics Teacher*, 49(2), 103–105.
- Gettrust, E. (2001). An extraordinary demonstration of Newton's third law. *The Physics Teacher*, 39(7), 392–393.
- Heering P., Kremer K. (2018) *Nature of Science*. In: Krüger D., Parchmann I., Schecker H. (eds) *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Higatsberger, M. J. (1977). *Physik in 700 Experimenten. Didaktik der Naturwissenschaften*. Frankfurt/Main: Blick in die Welt. Hilscher et al. 2006, S. 26–41

Literatur

- IQWST (2013): Physical Science 3: How Will It Move? Force and Motion. Norwalk: SASC LLC
- Joachim Herz Stiftung. (2019). Leifiphysik. Zugriff 30. 08. 2019 unter <https://www.leifiphysik.de/mechanik/kraefteaddition-und-zerlegung/versuche/kraeftegleichgewichtschuelerversuchMazur> 2017
- Muckenfuß, H. (1988). Bewegungsarten von Körpern als Zugang zum Kraftbegriff. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie*, 36(34), 11–20.
- Müller, R. (2009). *Klassische Mechanik. Vom Weitsprung zum Marsflug*. de Gruyter Lehrbuch. Berlin:Walter de Gruyter
- Oser, F. & Spychiger, M. (2005). *Lernen ist schmerzhaft. Zur Theorie des Negativen Wissens und zur Praxis der Fehlerkultur*. Weinheim: Beltz Pädagogik.
- Renkl, A., Gruber, H., Weber, S., Lerche, T. & Schweizer, K. (2003). Cognitive Load beim Lernen aus Lösungsbeispielen. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 17(2), 93–101.
- Rittle-Johnson, B. & R. Star, J. (2009). Compared With What? The Effects of Different Comparisons on Conceptual Knowledge and Procedural Flexibility for Equation Solving. *Journal of Educational Psychology - J EDUC PSYCHOL*, 101.
- Schecker, H. (1985). *Das Schülerverständnis zur Mechanik: eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftstheoretischer Aspekte*.

Literatur

- Schecker, H. & Wilhelm, T. (2018). Schülervorstellungen in der Mechanik: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. In Schülervorstellungen und Physikunterricht (S. 63–88). Berlin: Springer Spektrum.
- Tobias, V. (2010). *Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht: die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*. Berlin: Logos.
- Turner, L. (2003). System Schemas. *The Physics Teacher*, 41(7), 404–408.
- Van den Berg, E., & van Huis, C. (1998). Drawing forces. *The Physics Teacher*, 36(4), 222-223.
- Warren, J. W. (1979). Understanding Force. An account of some aspects of teaching the idea of force in school, college and university courses in engineering, mathematics and science. London: John Murray.
- Wilhelm, T. (2005). Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung. *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Berlin: Logos.
- Wodzinski, R. (1996). Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. *Naturwissenschaften und Technik - Didaktik im Gespräch*. Münster: LIT.
- Ziegler, E., & Stern, E. (2014). Delayed benefits of learning elementary algebraic transformations through contrasted comparisons. *Learning and Instruction*, 33, 131-146.

Herzlichen Dank...

... an die teilnehmenden Lehrerinnen und Lehrer und ihre Klassen

Frau von Boehn-Neitzel (Graf-Stauffenberg-Gymnasium), **Frau Freytag** (Clemens-August-Gymnasium),
Herr Gieschen (Ursulaschule), **Frau Helms** (Graf-Stauffenberg-Gymnasium), **Herr Kahnt** (Graf-Stauffenberg-Gymnasium), **Herr Polhout** (Angelaschule), **Frau Rottmann** (Carolinum), **Herr Schwenderling** (Carolinum),
Herr Striethorst (Carolinum)

... an die Studierenden, die an diesem Forschungsprojekt mitgewirkt haben

Herr Ackermann, **Herr Gelhoet**, **Frau Hoolt**, **Frau Nawrocki**, **Frau Neumann**, **Herr Raker**, **Herr Sander**, **Herr Schulz**

...die Arbeitsgruppe Physikdidaktik aus Bremen

...die Arbeitsgruppe Mathematikdidaktik aus Osnabrück

...an meine Arbeitsgruppe

Herr Berger, **Herr Frenzel**, **Herr Kahnt**, **Herr Korte**, **Herr Schwarz**, **Herr Würz**