

„Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung“

Teil A: Überblick über die Konzeption des Unterrichtskonzeptes:

Als ich Übungen zur Einführung in die Physik I machte, begegneten mir - wie erwartet und wie aus der Schule bekannt - auch nach den entsprechenden Vorlesungen viele typische, physikalisch falsche Vorstellungen, die von der Schülervorstellungsforschung ausführlich untersucht sind. Auch in der Schule ist es so: Trotz Veränderungen in Lehrplänen zeigen meine Untersuchungen, dass immer noch die meisten Schüler auch nach dem Physikunterricht der elften Jahrgangsstufe den newtonschen Kraftbegriff nicht verstanden haben. Häufig wurde auch keine physikalisch richtige Vorstellung des Beschleunigungsbegriffes erworben. Deshalb wurde von mir ein neues Unterrichtskonzept für den Kinematik- und Dynamikunterricht entwickelt, von dem ich hier nur wenige ausgewählte Gesichtspunkte vorstellen kann.

Eine Leitidee war, verschiedene Darstellungsformen für die Darstellung physikalischer Größen und ihrer Zusammenhänge zu nutzen. Man spricht von verschiedenen Codierungen. Auf das Wesentliche reduzierte Animationen können auf dem Bildschirm gleichzeitig mit der Messung dargestellt werden und erleichtern das Erinnern. Physikalische Größen und ihre Zusammenhänge können dann dargestellt werden mit piktogrammartigen Darstellungen wie Säulen, Vektoren und Verbindungslinien, deren Aussagen leicht zu erfassen sind. Wir nennen sie dynamisch ikonischen Repräsentationen. Graphen sind dagegen nur ein effizientes Vorgehen für die, die bereits über angemessene physikalische Konzepte verfügen und Graphen sicher lesen können. Demgegenüber möchte ich die Vorteile bildlicher Darstellungen an einigen wenigen Beispielen darlegen.

Im Alltag und bei vielen Schülern wird Geschwindigkeit auf eine Betragsgröße reduziert, die man mit Schnelligkeit oder Tempo bezeichnen könnte. Um bei einem Unterricht zu Beginn der Sek. II den vektoriellen Charakter der Größe Geschwindigkeit von Anfang an deutlich zu machen, ist es sinnvoll, schon bei der Einführung der Geschwindigkeit von zweidimensionalen Bewegungen auszugehen. Dazu wurden Bewegungen, die mit der normalen Computermaus auf dem Versuchstisch durchgeführt werden, betrachtet. Entsprechend der Bewegung der PC-Maus erhält man auf dem Bildschirm eine Bahnkurve, an die z.B. alle 0,4 s eine Zeitmarke oder ein Ortsvektor \vec{x} gezeichnet werden. Hier wird deutlich, dass „Ort“ einen Punkt im Bezugssystem meint, während „Weglänge“ für die Länge der Bahnkurve steht.

Die Änderung des Ortes in einem Zeitintervall Δt kann nun mit einem zusätzlichen Ortsänderungsvektor deutlich gemacht werden, der die Bewegungsrichtung angibt. Dividiert man den Ortsänderungsvektor durch das Zeitintervall, erhält man einen Vektor der Durchschnittsgeschwindigkeit.

Der Begriff Beschleunigung wird von den Schülern in seiner Komplexität auch oft reduziert. Am Drastischen ist die Reduktion auf Geschwindigkeit. Von mehr Verständnis zeugt die Reduktion der vektoriellen Beschleunigung auf eine skalare Größe, nämlich die Änderung des

Geschwindigkeitsbetrages. "Beschleunigen" heißt demnach "schnellerwerden", auch als "positive Beschleunigung" bezeichnet; "negative Beschleunigung" bedeutet dann "langsamerwerden".

Bei Bewegungen in negative Richtung führt diese Vorstellung zu entgegengesetzten Ergebnissen als das physikalische Konzept. Besonders schwierig wird es aber bei der zweidimensionalen Bewegung, da eine Kreisbewegung mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag nach dieser Vorstellung dann **keine** Beschleunigung ergibt und eine Zentripetalbeschleunigung nicht verstehbar ist.

Auch bei der Einführung der Beschleunigung ist es deshalb sinnvoll, von allgemeinen zweidimensionalen Bewegungen auszugehen. Die Änderung des Geschwindigkeitsvektors in einem Zeitintervall wird nun mit einem zusätzlichen Geschwindigkeitsänderungsvektor $\Delta\vec{v}$ deutlich gemacht, der angibt, was an Geschwindigkeit „dazukam“. Beim langsamen Ablauf sehen Sie, wie der Geschwindigkeitsvektor zu einem Zeitpunkt parallel verschoben wird, bis zum nächsten Zeitpunkt und so die Differenz, der Geschwindigkeitsänderungsvektor des Zeitintervalls, konstruiert wird. Man müsste ihn nur in die Mitte des Intervalls zeichnen. Dividiert man den Geschwindigkeitsänderungsvektor durch das Zeitintervall Δt , erhält man den Vektor der Durchschnittsbeschleunigung.

Eine andere Messmöglichkeit für zweidimensionale Bewegungen ist neben der PC-Maus das gerade gesehene Graphiktableau. Größere Bewegungen im Bereich von zehn bis hundert Meter kann man gut mit einem GPS-Gerät aufnehmen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Videoanalyse. Und ganz ohne Computer geht es mit der altmodischen Schwefelplatte, bei der man mit dem Finger Spuren in Schwefelstaub malt.

Auch zum Begriff „Kraft“ gibt es viele stabile Schülervorstellungen, die den physikalischen Vorstellungen widersprechen. Mit einer kontinuierlichen Messung mit dem Computer ist es nun möglich, zu jedem Zeitpunkt alle interessanten Größen zu sehen und zu vergleichen. Damit kann man zeigen, dass das zweite newtonsche Gesetz, also die Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung, selbst bei veränderlicher Kraft in jedem Augenblick gilt, nicht etwa nur im Mittel, wobei als veränderliche Kraft wurde die Hangabtriebskraft auf einer kippbaren Luftkissenfahrbahn gewählt.

In der Vorstellung der Schüler reduziert sich die Aussage des zweiten newtonschen Gesetzes außerdem in der Regel auf das Wirken einer Kraft. Der genannte Versuch lässt sich so erweitern, dass man in einem weiteren Versuchsdurchlauf, die Wirkung mehrerer äußerer Kräfte zeigen kann. Man erkennt in der ikonischen Darstellung, dass die Beschleunigung immer proportional zur vektoriellen Summe aller angreifenden Kräfte ist. Eine Fülle komplexer Versuche wurde von mir entwickelt und mit bildhaften Darstellungen, mit Animationen und Pfeilen für die Größen aufbereitet.

Ein weiterer Aspekt, auf die Wert gelegt wurde, ist, dass von Schülern häufig Vorhersagen über relevante Größen und über die sie darstellenden Pfeile mit ihren Richtungen verlangt wurden. Ein anderer Punkt ist der stärkere Einsatz von qualitativen, Verständnis verlangende Aufgaben mit ikonischen Darstellungen.

Um Vorstellungen beim Lernenden noch weiter zu unterstützen, wie Einzelabhängigkeiten untereinander verknüpft sind, kann man Wirkungszusammenhänge in der Dynamik auch dadurch visualisieren, dass in einer Skizze an der Tafel die Beziehungen zwischen den Größen durch Wirkungspfeile wiedergegeben werden. Werden solche graphischen Wirkungszusammenhänge nicht auf Papier sondern am Bildschirm mit einer Modellbildungssoftware erstellt, so können sie automatisch in ein Rechenprogramm umgesetzt werden, das den physikalischen Ablauf berechnet. Lernprozesse beim Erstellen des Modells helfen, eigene Vorstellungen über die Zusammenhänge zu klären. Eine Teiluntersuchung von mir ließ darauf schließen, dass mit der graphischen Modellbildung in Zusammenhang mit Animationen wirklich Verständnis gefördert wird.

Teil B: Überblick über die durchgeführte Evaluation:

Unter Berücksichtigung all dieser Aspekte wurde von mir ein Gesamt-Unterrichtskonzept entwickelt. Eine Zielsetzung der summativen Evaluation war festzustellen, inwieweit das gesamte Unterrichtskonzept von Lehrern durchführbar ist und wie diese es einschätzen. Ein weiteres Ziel war, mit Hilfe von Tests festzustellen, inwieweit es Veränderungen in den Schülervorstellungen gab und diese Veränderungen mit konventionell unterrichteten Klassen zu vergleichen.

Während der Evaluation haben insgesamt 13 Lehrer in 17 Klassen nach diesem Konzept unterrichtet. Für die teilnehmenden Lehrer wurde ein Vorbereitungs- bzw. Begleit-Seminar zu diesem Unterrichtskonzept angeboten. Außerdem erhielten die Lehrer sehr umfangreiche Unterrichtsmaterialien – auf einer CD und in einem Ordner mit über 200 Seiten.

Es zeigte sich, dass das Kinematikkonzept in der vorgeschlagenen Zeit durchführbar ist. Einige Lehrer haben neue gute Ideen mit eingebracht. Letztlich lobten die Lehrer das Konzept, das als inhaltlich geschlossen mit erkennbarem rotem Faden beschrieben wurde. Als besonders positiv wurde genannt, dass hier im Gegensatz zur Einführung in die Kinematik über eindimensionale Bewegungen Ort und Weglänge klar unterscheidbar sei sowie Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsbetrag. Das Herausarbeiten des zentralen Beschleunigungsbegriffes in Abgrenzung zur Geschwindigkeit gelänge hier deutlich besser als beim traditionellen Vorgehen. Insgesamt habe es den meisten Schülern gut gefallen und fast alle Lehrer waren überzeugt, dass die Schüler bei diesem Vorgehen die Begriffe Geschwindigkeit und insbesondere Beschleunigung besser als nach traditionellem Vorgehen verstanden hätten.

Im Gegensatz zur Kinematik wurde die Dynamik in den beteiligten Klassen unterschiedlich unterrichtet. Die Lehrer meinten aber, das Konzept sei insgesamt schlüssiger als konventioneller Unterricht. Es wurde z.B. geschätzt, dass beim zweiten newtonschen Gesetz in der Form $\vec{a} = \Sigma \vec{F} / m$ nun die Summe aller angreifenden Kräfte betont wird, da dies realitätsnäher ist und in Wirklichkeit immer mehrere Kräfte angreifen. Insgesamt meinten die Lehrer, dass die Schüler bei diesem Unterrichtskonzept den Begriff „Kraft“ und insbesondere den Zusammenhang mit der Beschleunigung besser als nach einem traditionellen Vorgehen verstanden hätten. Konkret werde im Unterrichtsgespräch mehr Verständnis gezeigt.

Die Lehrer waren der Meinung, dass die Visualisierungsmöglichkeiten, insbesondere die Darstellung der Größen und ihrer Änderungen durch Vektoren, also die dynamisch ikonischen Repräsentationen, hilfreich seien: Diese anschaulichen Darstellungen auch bei komplexen Versu-

chen trügen viel zum Verständnis bei und seien Grundlage für gute Diskussionen. Die Darstellungen mit Pfeilen leuchten angeblich allen Schülern sofort ein.

Ein wichtiges Prinzip dieses Unterrichtskonzeptes ist, von den Schülern konkrete Vorhersagen zu den Abläufen zu fordern. Die meisten Lehrer gaben an, dass sie diese Vorhersagen verlangten. Anfangs waren die Schüler hier anscheinend zögerlich, was sich aber änderte. Häufig bildeten sich zwei Lager mit zwei unterschiedlichen Vorhersagen. Nach dem Ablauf waren die Vorhersagen dann eine gute Grundlage für Diskussionen. Nach Lehrerangaben hat das Vorhersagenmachen den Schülern gefallen, wodurch ein sportlicher Aspekt hinzukam.

Die Modellbildung wurde in den nicht-naturwissenschaftlichen Zweigen entweder gekürzt oder in einigen Fällen ganz weggelassen. Die Lehrer, die Modellbildung einsetzten, waren davon ohne Ausnahme begeistert. Besonders gefiel, dass man die Konsequenzen der gemachten Fehler schnell sieht und gemeinsam versuchen kann, dies zu analysieren, ohne dass der Lehrer die Fehler benennt. Gerade die Fehlersuche wurde als wertvoll eingeschätzt. Geschätzt wurde auch, dass man interessante Probleme wie Luftreibung behandeln kann, die ohne Modellbildung nicht so gut zugänglich sind.

Neben der Erhebung der Lehrermeinungen wurden auch verschiedene Verständnistests als Vor- und Nachtests durchgeführt, woran die meisten Klassen teilnahmen. Da die verwendeten Tests verschiedene Schwächen haben, wurden mehrere verschiedene Tests gleichzeitig eingesetzt, die sich gegenseitig ergänzen. Zu den Tests wurden Vergleichswerte von konventionell unterrichteten Klassen erhoben. Aus der Fülle der Daten können hier nur wenige vorgestellt werden.

Beginnen wir mit der Kinematik. Bei einer Aufgabe waren für eine Rennstrecke die Bewegungsrichtung des Autos und die Änderung der Schnelligkeit angegeben und es sollte jeweils der Beschleunigungsvektor eingezeichnet werden, so dass die Schüler nicht „+“ bei Schnellerwerden und „-“ bei Langsamerwerden angeben konnten. Die beiden Items zur geradlinigen Bewegungen und die drei Items zu Kurvenbewegungen (mit konstantem Tempo, Schneller- und Langsamerwerden) hatten jeweils hohe Reliabilitäten.

Bei traditionellem Unterricht gaben bei geradlinigen Bewegungen nach dem Mechanikunterricht durchschnittlich 90 % der Schüler eine richtige Lösung, während bei Kurvenfahrten nur durchschnittlich 9 % die richtige Lösung angaben. Dagegen gaben durchschnittlich 59 % einen Pfeil an, der mehr oder weniger die tangentielle Beschleunigung angibt, wobei man annehmen kann, dass häufig eine „Schneller-/Langsamer-Vorstellung“ in Pfeile umgesetzt wurde. Bei den geradlinigen Bewegungen konnte kein großer Unterschied zwischen der Treatmentgruppe und der Kontrollgruppe festgestellt werden. Aber bei Kurvenfahrten ergaben sich sehr große und höchst signifikante Unterschiede: 77 % der getesteten Schüler der Treatmentgruppe gaben im Durchschnitt eine richtige Antwort im Gegensatz zu nur 9 % bei der Kontrollgruppe, was eine sehr große Effektstärke von fast 3 ergibt. Die Effektstärke ist im Wesentlichen die Differenz der Mittelwerte dividiert durch eine gemittelte Standardabweichung.

Die Frage war, ob die Schüler aber so viel Verständnis gewonnen haben, dass sie auch Testaufgaben zur eindimensionalen Kinematik mit Grapheninterpretation genauso wie konventionell unterrichtete Klassen lösen können, denn die eindimensionale Kinematik und die Grapheninterpretation kam in diesem Unterrichtskonzept kürzer vor als es in konventionellen Klassen der Fall ist. Oder andere Frage: Hilft ihnen ihr größeres Verständnis sogar zu besseren Ergebnis-

sen? In den Aufgaben waren zu beschriebenen eindimensionalen Bewegungen jeweils der passende Zeit-Beschleunigungs-Graph auszuwählen. Die betrachteten sechs Aufgaben haben erfreulicherweise eine hohe Reliabilität. Zu Beginn der elften Jahrgangsstufe werden diese nur von durchschnittlich 12 % der Schüler richtig gelöst, während durchschnittlich 71 % so antworten als wäre nach der Geschwindigkeit gefragt worden. Nach einem traditionellen Unterricht antworten durchschnittlich 47 % der Schüler richtig und 37 % noch entsprechend der Geschwindigkeit. Bei Bewegungen nach links antworten durchschnittlich 7 % so, als wäre die Beschleunigung die Änderung des Geschwindigkeitsbetrages, also „+“ = schneller und „-“ = langsamer. Bei der Treatmentgruppe ist kein signifikanter Unterschied nachweisbar. Dass in diesem Konzept eindimensionale Bewegungen weniger als im herkömmlichen Unterricht behandelt wurden und stattdessen das Verständnis für die Größen an zweidimensionalen Bewegungen geschult wurde, wirkt sich also nicht auf das Lösen der Aufgaben zu eindimensionalen Bewegungen aus. Man kann dies als Erfolg, dass sie nicht schlechter sind, oder als Misserfolg, dass sie nicht besser sind, deuten.

Interessant ist eine Aufgabe zur Beschleunigung beim senkrechten Münzwurf, bei dem natürlicherweise eine Bewegung mit Richtungsumkehr auftritt. Sollte das Vorzeichen der Beschleunigung bei gegebenem Koordinatensystem angegeben werden, gaben nur 7 % der Schüler nach dem herkömmlichen Unterricht für alle drei Phasen (hoch, oben, herunter) die richtige Antwort, 10 % wenigstens für die Auf- und Abwärtsphase. Eine Antwort, die der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages entspricht, geben 36 % der Schüler und 41 % gaben eine der Geschwindigkeit entsprechende Antwort. Hier waren die Schüler der Treatmentgruppe signifikant besser: Beim Vorzeichen gaben 39 % eine richtige Antwortkombination gegenüber den 7 % in der Kontrollgruppe. Interessant sind die Ergebnisse, wenn die Antworten mit Pfeilen gegeben werden sollten, denn dann haben die Schüler Probleme, für die die Beschleunigung nur eine skalare Größe ist. In der Treatmentgruppe geben 42 % eine richtige Antwortkombination gegenüber 9 % in der Kontrollgruppe. Pfeile, die der Geschwindigkeit entsprechen, wurden nur von 27 % angegeben gegenüber 62 % in der Kontrollgruppe. Deshalb wird gefolgert, dass in den nach diesem Unterrichtskonzept unterrichteten Klassen mehr Schüler ein physikalisch angemessenes Beschleunigungskonzept erreicht haben und eine Vorstellung von der Richtung der Beschleunigung haben.

Zum Abprüfen des Verständnisses des newtonschen Kraftkonzeptes wurde der „Force Concept Inventory“, kurz FCI, ein international bekannter und genutzter Test verwendet. Der Test besteht aus Denkaufgaben zur newtonschen Mechanik, bei denen Antwortalternativen auf bekannte Schülervorstellungen abgestimmt sind und eine Entscheidung zwischen dem newtonschen Konzept und den Alltagsvorstellungen erzwungen wird. Der Test beansprucht für sich, das newtonsche Kraftkonzept abzuprüfen mit allen drei newtonschen Gesetze für ein- und zweidimensionale Bewegungen. Formal handelt es sich um Multiple-Choice-Aufgaben mit je fünf Antwortalternativen.

Der Test wurde im Gegensatz zu den USA in Deutschland bisher nur wenig eingesetzt, während er im Rahmen dieser Arbeit erstmals einer größeren Anzahl von Schülern gestellt wurde. Es haben 13 herkömmlich unterrichtete elfte Klassen aus fünf bayerischen Gymnasien die erste Version des FCI-Tests am Schuljahresbeginn und im letzten Schuljahresdrittel durchgeführt.

Die Schüler lösen am Beginn der elften Jahrgangsstufe 28 % der 29 qualitativen Items richtig und nach dem Mechanikunterricht 41 %, was ein relativer Zugewinn von nur 18% ist. Besonders geringe relative Zugewinne liegen bei den Subskalen „zweites newtonsches Axiom“ und „Superposition“ vor. Hier macht sich auch bemerkbar, dass im herkömmlichen Unterricht fast nur eindimensionale Bewegungen betrachtet werden. Korrelationen, Faktorenanalyse und Reliabilitäten bestätigen allerdings die in der Literatur geäußerte Kritik an dem FCI-Test, d.h. an der Einteilung in die einzelnen Subskalen.

In der Treatmentgruppe wurden im Nachtest 53 % der Aufgaben richtig gelöst im Gegensatz zu nur 41 % in der traditionell unterrichteten Vergleichsgruppe, was ein höchst signifikanter Unterschied ist und eine relativ hohe Effektstärke von $d = 0,77$ ergibt. Auch der relative Zugewinn der Schüler ist mit 31 % höchst signifikant höher als in der Vergleichsgruppe mit 18 %. Der Anteil der Schüler, die mehr als ca. 60 % richtig beantworteten (17 oder mehr der 29 Items), was als Schwelle für ein newtonsches Verständnis angesehen werden kann, liegt mit 42 % deutlich höher als in der Vergleichsgruppe mit 16 %. Der größte relative Zugewinn wurde dabei in der Subskala „drittes newtonsches Axiom“ erreicht. Die größte Effektstärke im Vergleich zur Vergleichsgruppe wurde in der Subskala „Kraftverständnis“ erzielt. Damit kann als nachgewiesen gelten, dass deutlich mehr Schüler der Treatmentgruppe ein qualitatives Verständnis des newtonschen Kraftbegriffes erreicht haben.

Betrachten wir noch die Items, bei welchen sich die relativen Zugewinne bei Kontroll- und Treatmentgruppe um mehr als 20 Prozentpunkte unterscheiden. Das sind fast alle Items zum dritten newtonschen Gesetz, das anders als herkömmlich unterrichtet wurde. Außerdem wurden alle Items zur Kinematik, die Items zu zweidimensionalen Bewegungen, Items zur vektoriellen Summe von Kräften und Wurfbewegungen besser gelöst, was jeweils auf das Unterrichtskonzept zurückgeführt werden konnte.

Zum Verständnis des ersten und zweiten newtonschen Gesetzes bei eindimensionalen Bewegungen wurden ähnliche Testaufgaben wie in der eindimensionalen Kinematik gestellt. Die Schüler sollten in mehreren Items jeweils die Kraft herausuchen, die eine beschriebene Bewegung bewirkt. Reliabilitäten und Faktorenanalyse sprechen für diesen Test. Waren die Kräfte mit Worten beschrieben, gaben nur durchschnittlich 32 % der herkömmlich unterrichteten Schüler nach dem Mechanikunterricht der Oberstufe eine richtige Antwort. Dagegen gaben noch durchschnittlich 51 % der Schüler eine Antwort, bei der sich die Kraft wie die Geschwindigkeit verhält. In der Treatmentgruppe haben mit 39 % der Schüler signifikant mehr Schüler als in der Kontrollgruppe entsprechend der newtonschen Vorstellung geantwortet. Aufgrund der sehr hohen Standardabweichung ergibt sich trotzdem nur eine kleine Effektstärke.

Werden dagegen die möglichen Antworten statt als Text mit Zeit-Kraft-Graphen angegeben, geben deutlich weniger Schüler eine newtonsche Antwort. Beim herkömmlichen Unterricht steigt der Wert hier von durchschnittlich 9 % vor dem Unterricht auf nur 21 % nach dem Unterricht. Der Anteil von „aristotelischen“ Antworten fällt dagegen kaum von im Durchschnitt 69 % nur auf 65 %. Obwohl die Schüler bei Geschwindigkeits-Zeit-Graphen bewiesen haben, dass sie Graphen lesen können, ist das Ergebnis hier deutlich schlechter als beim Antwortformat in Textform. Die Kombination aus Grapheninterpretation und Überlegung der richtigen Kraft ist offensichtlich deutlich schwerer als jede dieser Aufgaben allein. In der Treatmentgruppe haben

mit 34 % ebenfalls signifikant mehr Schüler als in der Kontrollgruppe entsprechend der newtonschen Vorstellung geantwortet. Allerdings ist die Effektstärke mit 0,34 nur schwach.

Schüler wurden auch gebeten, nach dem Dynamikunterricht Concept Maps, also Begriffsnetze, mit vorgegebenen kinematischen und dynamischen Begriffen zu erstellen. Aus den einzelnen Concept Maps wurden so genannte Modalmaps erstellt, die die häufigsten Verbindungen der Gruppe wiedergeben. Bei den traditionell unterrichteten Schülern wurde als zentralste Größe die Geschwindigkeit verwendet, während die Beschleunigung erst an zweiter Stelle kommt. Die Kraftgrößen und die Bewegungsgrößen sind wenig miteinander vernetzt, wobei Luftwiderstand und Reibung aber anscheinend nicht als Kräfte angesehen werden, sondern im kinematischen Zusammenhang mit Geschwindigkeit verwendet werden. Mit dem Begriff „Summe aller angreifenden Kräfte“ können die Schüler nichts anfangen; nur ein Zehntel gibt an, dass dies die Beschleunigung bestimmt. Nur ein Drittel gibt an, dass die Beschleunigung von der Zugkraft abhängt, und nur ein Fünftel, dass sie von der Masse abhängt. Dagegen findet sich bei einem Drittel der Schüler die falsche Aussage „Beschleunigung wirkt auf Kraft“ und bei einem Fünftel „Masse beeinflusst Kraft“. D.h. diese Schüler haben das zweite newtonsche Gesetz in der Form $F = m \cdot a$ nicht verstanden, sondern nur eine Formel gelernt.

Die Klassen, in denen nach dem Gesamtunterrichtskonzept einschließlich Modellbildung unterrichtet wurde, zeigten am Schuljahresende in Concept Maps mehr Verständnis als konventionell unterrichtete Klassen. So hat der Begriff „Summe der angreifenden Kräfte“ eine hohe Bedeutung. Der zentralste Begriff ist die Beschleunigung, während z.B. die Geschwindigkeit nicht mehr als so zentraler Begriff gesehen wird. Reibung und Luftwiderstand werden hier als spezielle Kräfte angesehen. Nicht nur physikalisch falsche Aussagen kommen deutlich seltener vor. Die aus physikalischer Sicht wesentlichen Verbindungen kommen viel häufiger vor, wie $\Sigma F \rightarrow a$, $m \rightarrow a$ oder $a \rightarrow v$. Vor allem, wenn man schaut, wo die zentrale newtonsche Argumentationskette ganz vertreten ist, findet man große Unterschiede. Die Concept Maps, d.h. Begriffsnetze zur Dynamik, zeigen deutlich, dass die Schüler der Treatmentklassen ein wesentlich größeres strukturelles Verständnis erreichten als herkömmlich unterrichtete bayerische Schüler.

Auf weitere eingesetzte Tests kann aus Zeitgründen nicht eingegangen werden. Ein Fragebogen zur Modellbildung zeigte, dass die Schüler Modellbildung sehr positiv einschätzen. Ein anderer Test zeigte, dass diese Schüler eher der Meinung sind, Physik habe etwas mit der Realität zu tun, als herkömmlich unterrichtete Schüler.

Teil C: Zusammenfassung

Nun noch eine kurze Gesamtzusammenfassung meines Vortrages: Mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen am Computer sind neue Elementarisierungen in der elften Klasse möglich. So ist die Vereinfachung des Beschleunigungsbegriffes durch die Darstellung mit Pfeilen eine bessere Elementarisierung als die Reduzierung auf eindimensionale Bewegungen. Außerdem ermöglichen diese Darstellungsformen neue Unterrichtsstrategien, wie z.B. das häufige Fordern von Vorhersagen. Das entwickelte Gesamtkonzept wird von Lehren sehr positiv beurteilt und hat das Verständnis bei den Schülern gefördert.

Vielen habe ich für ihren Beitrag zu dieser Arbeit zu danken. Besonders will ich die Wilhelm-und-Else-Heraeus-Stiftung erwähnen, die die Evaluation finanziell unterstützte.