

Thomas Wilhelm<sup>1</sup>  
 Verena Tobias<sup>2</sup>  
 Christine Waltner<sup>2</sup>  
 Martin Hopf<sup>3</sup>  
 Hartmut Wiesner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universität Augsburg  
<sup>2</sup>LMU München  
<sup>3</sup>Universität Wien

## Design-Based Research am Beispiel der zweidimensional-dynamischen Mechanik

### Situation der fachdidaktischen Forschung

Physikdidaktische Forschung hat heute eine hohe Qualität und es werden hoch elaborierte statistische Methoden eingesetzt. Kritiker weisen aber darauf hin, dass die bisherigen wissenschaftlichen Studien aus dem Umfeld von Schule und Unterricht - zur Kontrolle von Einflussfaktoren meist als Labor- oder laborähnliche Studien durchgeführt - sehr häufig keine oder nur geringe signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppen aufweisen (Bereiter, 2002) oder aus Sicht der Schulpraktiker banale Selbstverständlichkeiten oder nichtpraktikable Vorschläge liefern. So ist es nicht verwunderlich, dass die physikdidaktische Forschung häufig nur recht eingeschränkte Auswirkungen auf die Unterrichtspraxis hat. Selbst Erfolg versprechende Forschungsergebnisse kommen kaum in die Schulpraxis. Dieses Theorie-Praxis-Problem ist aus vielen Disziplinen bekannt und unterschiedlich beschrieben (z.B. Stark, 2004).

Deshalb ist es nötig, sich auch über Forschungskonzeptionen Gedanken zu machen. Die Arbeiten in der Physikdidaktik werden manchmal zwischen den beiden Polen reine Grundlagenforschung und anwendungsbezogene Entwicklung eingeordnet. Dahinter steht z.T. eine naive Vorstellung vom Forschungstransfer: Grundlagenforschung und anwendungsbezogene Forschung werden dabei als zwei entgegengesetzte Pole der Forschung angesehen und Forschungsergebnisse gehen von selbst aus der Grundlagenforschung über die Anwendungsforschung in die Praxis; praktische Anwendungen haben keine Auswirkung auf Fragen der Grundlagenforschung. Tatsächlich aber erfährt die Grundlagenforschung auch Anstöße aus der Praxis und entwickelt sich nicht unabhängig von der anwendungsbezogenen Forschung.

Der Politikwissenschaftler Stokes (1997) schlägt in wissenschaftstheoretischen Überlegungen eine andere Klassifizierung von Forschung vor. Dazu werden die (vermuteten bzw. rekonstruierten) Motive der entsprechenden Wissenschaftler in zwei Dimensionen bewertet. Einerseits wird dabei gefragt, wie stark die jeweilige Forschung dem Motiv unterstellt war, Erkenntnisse über den Untersuchungsgegenstand zu generieren. Andererseits wird geschaut, wie stark die Forschung nutzenorientiert ausgerichtet wurde. Die zwei Dimensionen „Erkenntnisorientierung“ und „Nutzenorientierung“ spannen ein zweidimensionales Koordinatensystem auf, in dem Forschungsprojekte eingeordnet werden können.

Zusätzlich teilt Stokes das Koordinatensystem in vier „Quadranten“ ein, die durch hohe oder niedrige Ausprägungen der beiden Dimensionen von Forschung gekennzeichnet sind. Jedem



Jedem

Quadranten wird nun ein archetypischer Wissenschaftler zugeordnet. Der Pflanzenforscher Carl von Linné hat viele Pflanzen gesammelt und kategorisiert und damit viele Fakten gesammelt, was zunächst keinen direkten praktischen Nutzen hatte und kein direktes Verständnis brachte. Niels Bohr ist ein typischer Vertreter der reinen Grundlagenforschung ohne jegliches Interesse an technischen Anwendungen. Getrieben von wissenschaftlicher Neugier stand bei ihm die reine Erkenntnisgewinnung im Vordergrund. Zum damaligen Zeitpunkt war nicht zu erkennen, wie ein Nutzen aus diesen Forschungen zu gewinnen sein könnte, obwohl sie langfristig für die Weiterentwicklung der Physik von Bedeutung war. Den Gegenpol bildet Thomas Alva Edison. Er hat in einem industriellen Forschungslabor an der elektrischen Beleuchtung geforscht, was industriell nutzbar und wirtschaftlich profitabel sein sollte. Louis Pasteur steht archetypisch für eine Ausrichtung sowohl an hoher Erkenntnisgewinnung als auch an hohem Nutzen. Ausgehend z.B. von dem praktischen Problem, wie man das Verderben von Wein und Bier bei der Herstellung verhindern kann, entdeckte Pasteur bestimmte Bakterien, die ohne Sauerstoff leben können. Dies war sowohl eine bedeutende Grundlagenerkenntnis als auch von großem praktischem Nutzen für die Produktion, die er dadurch veränderte. Durch seine Forschungen zu Krankheitsursachen lieferte er wissenschaftliche Fundierungen für Maßnahmen zur Verbesserung der Hygiene. Hier kann man von nutzenorientierte Grundlagenforschung sprechen. Wichtig ist dabei, dass mit der Zuordnung einzelner Menschen auf die Zellen des Quadranten keine Wertung verbunden ist. Physikdidaktik als Wissenschaft kann nun genau wie jede andere Wissenschaft auch in unterschiedlichen Zellen des Quadrantenmodells verortet werden und für jede Entscheidung gibt es dabei gute Gründe. In Anbetracht der oben erwähnten Probleme ist für uns die nutzenorientierten Grundlagenforschung ein Vorbild.

### **Design-Based Research**

Ein Ansatz, der diese nutzenorientierte Grundlagenforschung verfolgt, ist der einer Forschergruppe, die ihren Ansatz „Design-Based Research“ nennt und Design als einen Prozess versteht, um Probleme zu lösen (Design-Based Research Collective, 2003; Fischer et al. 2005; Hopf & Wiesner, 2007 a+b, 2008). Hier geht es darum, gleichzeitig gute Lernumgebungen zu entwickeln und eine Theorien des Lernens in diesem Themenbereich zu entwerfen. Entwicklung und Forschung finden dabei in kontinuierlichen Zyklen aus Design, Umsetzung, Analyse und Re-Design statt (Reinmann, 2005). Ziel ist eine explizite Theorie zur Lösung eines praktischen Problems, die Implikationen für den Praktiker hat. Sowohl bei der Entwicklung der Lernumgebung als auch bei der Theorie müssen die jeweiligen konkreten Rahmenbedingungen berücksichtigt werden bzw. als explizite Komponente in die Theorie integriert werden. Dazu müssen also Interventionsmaßnahmen im Feld in Zusammenarbeit von Forschern und Praktikern durchgeführt werden. Aber im Gegensatz zu reinen Evaluationsstudien möchte man auch eine Theorie des Lehrens und Lernens des entsprechenden Themengebietes entwickeln.

Die Begriffe „Design-Based Research“, „Design Research“, „fachdidaktische Entwicklungsforschung“ (Prediger & Link, 2012) oder „Didaktik als Design Science“ vertreten alle diese gleiche Grundidee. Das Ergebnis entsprechender Forschung sollen Entwicklungsprodukte, z.B. Schulbücher bzw. Unterrichtsmaterialien, übertragbare theoretische designbezogene Erkenntnisse und empirische Forschungsergebnisse sein.

Noch weiter geht der „integrative Forschungsansatz“ von Mandl und Stark (2001). Sie fordern eine systematische Kombination von experimenteller Laborforschung mit expliziter Praxisorientierung und Feldforschung. Dabei soll bei der Entwicklung, Optimierung und Evaluation nicht nur der kognitive Aspekt des Wissenserwerbs berücksichtigt werden, sondern auch motivationale Perspektiven. Bei den Forschungsmethoden plädieren sie für einen Methodenpluralismus, d.h. quantitative und qualitative Methoden. Und schließlich wünschen sie eine Kooperation von Experten aus Wissenschaft und Praxis auf allen Ebenen.

### **Vorbild Ingenieurwissenschaft**

Bei dieser nutzenorientierten Grundlagenforschung bleibt aber dennoch das Problem des Forschungs-Praxis-Transfers. Die Design-Forschung lässt offen, wie die Materialien dann in die breite Anwendung kommen. Hier kann der ingenieurwissenschaftliche Ansatz von Burkhardt und Schoenfeld (2003) als Vorbild dienen. Ingenieure arbeiten an konkreten Problemstellungen, die nach verschiedenen Kriterien auf der Basis des gegenwärtigen Wissens optimal gelöst werden sollen. Bei der Problemlösung bzw. Produktverbesserung treten neue Fragestellungen bezüglich der Grundlagen auf, es wird neues Wissen produziert, neue Design- und Testmethoden entwickelt. Dabei ist auch eine langfristige Zusammenarbeit mit Praktikern wichtig. Was über Obiges hinausgeht, ist, dass die Ingenieurwissenschaften explizit erforschen, wie es zu einer Verbreitung kommt, und sich darum bemühen.

### **Ansätze für Conceptual Change**

Im Folgenden soll ein Forschungsprojekt beschrieben werden, das Aspekte von Design-Based Research und von Ingenieursorientierung berücksichtigt, d.h. Entwicklung von Materialien für praktische Probleme, Erarbeitung von Theorien und klassische Evaluationen. Grundlage ist eine konstruktivistische Auffassung vom Lernen. Neues kann demnach vom Lernenden nur erfasst werden, wenn geeignetes Vorwissen aktiviert werden kann. Schüler kommen aber bereits mit vielen Vorstellungen über physikalische Begriffe und Phänomene in den Unterricht (Alltagskonzepte). Wenn nun ungeeigneten Vorstellungen aktiviert werden, treten Probleme bzw. Lernschwierigkeiten auf. Jeder Lernweg von Schülervorstellungen zu wissenschaftlichen Vorstellungen kann dabei als Konzeptwechsel (conceptual change) bezeichnet werden. Wie man einen entsprechenden Unterricht plant, hängt davon ab, welche Theorie des Begriffswechsels man zugrunde legt.

Ein erster Ansatz ist der des Kategorienwechsel, der von Jung 1979 in die didaktische Diskussion eingebracht wurde. Er nannte für physikalische Begriffe vier Kategorien: „Körper“, „Prozess“, „Eigenschaft“ und „Beziehungen“ (Jung, 1979+1980). Beispielsweise ist „Kraft“ für den Schüler eine Eigenschaft, die man hat oder nicht - unabhängig davon, ob man sie auch nutzt. Für den Physiker ist es dagegen eine Beziehung. Beim Begriffslernen müssen die Schüler deshalb umkategorisieren. Dieses Umkategorisieren ist auch der zentrale Aspekt der Begriffswechseltheorie von Chi, Slotta, Reiner, Resnik u.a. „Kraft“ gehört demnach physikalisch zur Kategorie „Prozess“, während Schüler ihn der Kategorie „Substanz“ zuordnen (Reiner et al., 2000 und Chi, 2008).

Ein zweiter bekannter Ansatz wird von Vosniadou (1994) vertreten. Demnach entwickelt sich schon in früher Kindheit eine kleine Zahl stabiler Strukturen, die einer Theorie ähneln. Man darf deshalb im Unterricht nicht an einzelnen Wissenselementen ansetzen, sondern man muss bei den grundlegenden Annahmen ansetzen. Dieser Begriffswechsel ist schwierig und langwierig.

Viele Studien zeigen aber, dass Schülervorstellungen nicht durchgängig konsistent und nicht so stabil sind, wie man das von einer vernetzten Theorie erwartet. Sie sind dagegen vielfältig, kontextabhängig und widersprüchlich. Mandl spricht hier von Wissenskompartimentalisation (Mandl et al., 1993) und Hartmann (2004) von Erklärungsvielfalt. DiSessa meint entsprechend, Schüler haben viele fragmentierte Wissenselemente, die er p-primes nennt, und diese werden je nach Situation unterschiedlich stark aktiviert (diSessa, 1993). Lernen heißt demnach, neue p-primes abzuspeichern und sie mit den vorhandenen neu zu organisieren, so dass sich deren Aktivierungswahrscheinlichkeit ändert. In diesem Sinne spricht man besser von Begriffsentwicklung.

In dem im Folgenden beschriebenen Konzept wurde versucht, alle drei Sichtweisen zu berücksichtigen. Dabei wurde die Theorie von diSessa in größerem Umfang berücksichtigt als das bisher in der Physikdidaktik üblich war. Unsere Designvorschrift lautete quasi: „Finde die Schlüsselreize, die anknüpfungsfähige p-primes aktivieren.“ Ein solcher Schlüsselreiz ist

der senkrechte Stoß. Diese Lehr-Lernstrategie kann man „instruktionsinduzierte Begriffsentwicklung“ nennen und sie ist damit ein Gegenpol zu offenen Lernumgebungen mit dem Schwerpunkt auf selbstentdeckendem Lernen.

### **Das Forschungsprojekt zur Mechanik**

Die gesamte Mechanik macht je nach Bundesland fast ein Drittel des Physikunterrichts der Sekundarstufe I aus. Grundlage dieser Mechanik ist der newtonsche Kraftbegriff. Viele Untersuchungen zeigen aber, dass immer noch die meisten Schüler auch nach dem Physikunterricht den newtonschen Kraftbegriff nicht verstanden haben. Häufig wurde auch keine physikalisch richtige Vorstellung des Beschleunigungsbegriffes erworben. Die newtonsche Mechanik ist damit eines der schwierigsten Inhaltsgebiete der Schulphysik. Die Gründe für die großen Lernschwierigkeiten in der Mechanik sind sicher zahlreich. Ein Grund liegt in der Komplexität des Themas selbst. Ein anderer Grund ist, dass es in diesem Bereich besonders viele und besonders stabile Schülervorstellungen gibt. Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass die von den Lehrkräften verwendete Sachstruktur mit für die Lernschwierigkeiten verantwortlich ist. Und schließlich werden ungeeigneten Darstellungen verwendet, z.B. wird zu früh mit Graphen gearbeitet und Neues daran veranschaulicht, obwohl man weiß, dass sich Schüler mit dem Graphen-Lesen schwer tun.

Das Unterrichtskonzept wurde zunächst für das achtjährige Gymnasium in Bayern entwickelt. Der dafür neu entworfene Lehrplan (ISB, 2011) fordert bereits in der siebten Jahrgangsstufe eine erste, dynamische Einführung in die Mechanik, was Lehrkräfte früher in der elften Jahrgangsstufe verorteten. Für etliche Lehrkräfte war unklar, wie sie dies bereits in der siebten Jahrgangsstufe unterrichten sollen, so dass hier ein echtes Praxisproblem vorlag. Diesem Projekt gingen mehrere Zyklen aus theoriebasierter Entwicklung, Erprobung und empirischer Wirkungsforschung voraus. Zum einen waren dies mehrere Zyklen in Frankfurt bzw. München, in denen Schülervorstellungen erforscht wurden und darauf abgestimmte Konzepte entwickelt wurden (Wiesner et al., 2010). Zum anderen waren dies mehrere Zyklen in Würzburg, in denen es stärker um Messverfahren und die Darstellung physikalischer Größen ging. Beide Linien fanden im aktuellen Kooperationsprojekt zusammen. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie diese zu Design-Based Research passen.

### **Vorausgehender Zyklus in Frankfurt: Grundschulprojekt von Jung**

Bereits Ende der 1960er Jahre initiierte Jung unter Mitarbeit von Reul und Schwedes ein Projekt, das sie als einen ersten Schritt in einem langfristig angelegten Forschungsprojekt „Lernschwierigkeiten im Physikunterricht“ ansahen. Der lern- und entwicklungs-theoretische Ansatz entsprach dem, der heute als konstruktivistische Auffassung vom Lernen bezeichnet wird. Schon damals setzte sich Jung kritisch mit den Theorien von Piaget auseinander und widersprach der strikten Stufenfolge mit ihrer Einschränkung bezüglich der kognitiven Möglichkeiten von Kindergarten- und Schulkindern (Inzwischen besteht über die erstaunliche kognitive Leistungsfähigkeit jüngerer Kinder Konsens, z.B. Wilkening & Lamsfuß, 1993; Stern, 2003). Entsprechend ging die Gruppe entgegen der Auffassung von Piaget als Hypothese davon aus, dass bereits Grundschulkindern die grundlegenden Ideen der Mechanik (vektorieller Geschwindigkeitsbegriff, Zusammenhang von Geschwindigkeitsänderung und Einwirkung, Konzept des Stoßes) vermittelt werden können. Es wurden ein Unterrichtskonzept inklusive Experimenten, Medien und Leistungstest entwickelt und nach einer Vorstudie wurden es in der Hauptstudie in den Klassenstufen 3, 4, 5 und 6 untersucht (Jung, Reul & Schwedes, 1975).

Von Interesse sind die zentralen fachdidaktischen Entscheidungen. So wurden zweidimensionale Bewegungen betrachtet, um daran konsequent zwischen Geschwindigkeit (als gerichtete Größe) und Schnelligkeit (als deren Betrag) zu unterscheiden. Der Stoß wurde als Paradigma für Wechselwirkung betrachtet. Eine solcher Stoß führt zu einer Zusatzgeschwindigkeit

keit  $\Delta\vec{v}$ , die als Elementarisierung der Beschleunigung betrachtet werden kann. Insbesondere der senkrechte Stoß wurde als Schlüsselphänomen betrachtet. Außerdem wurde die Zusatzgeschwindigkeit mit Hilfe der Bewegung eines Förderbandes gedeutet, womit die Zusatzgeschwindigkeit als eine reale Geschwindigkeit interpretiert werden sollte.

Die empirische Studie mit insgesamt 473 Schülerinnen und Schüler aus den Klassenstufen 3 bis 6 Klassen ergab verblüffend hohe Lernerfolge, insbesondere in den Klassenstufen 3 und 4. Da auch ein Lehrerhandbuch zu dem Projekt erschien, kann gesagt werden, dass das beschriebene Projekt heute als erster Zyklus eines Forschungsprojektes gemäß Design-Based Research aufgefasst werden kann.

### **Vorausgehender Zyklus in Frankfurt: Das Stoßratenkonzept**

Ab der Endphase des beschriebenen Projektes gab es parallel zueinander verlaufend eine Vielzahl von Weiterentwicklungen und Studien in enger Verzahnung und gegenseitiger Bezugnahme. So wurde das Konzept zum Stoßratenkonzept weiterentwickelt und dazu Lernumgebungen entwickelt und evaluiert (bis etwa 1985). Gegenüber dem Grundschulprojekt wurde nun eine eigene quantitative Größe eingeführt:  $\text{Stoß} = m \cdot \Delta\vec{v}$ . Die Kraft wird dann

als Stoßrate eingeführt:  $\vec{F} = \frac{\Sigma \text{Stoße}}{\Delta t}$  (Jung, 1977 a+b). Wichtige Teilprojekte für die Se-

kundarstufe I waren 1974 Zepperitz und 1975 Trageser. Von Jung wurde dazu ein Schulbuchtext „Mechanik für die Sekundarstufe I“ geschrieben (Jung, 1980). Für die Sekundarstufe II wurden Lehrgänge mit gleichem Konzept entwickelt und evaluiert: Jung und Callsen (1974) für die 11. Jahrgangsstufe, Engelhardt 1976 für Grundkurse, Wiesner 1976 und 1980 für Leistungskurse und ab 1982 Ausarbeitung eines Schulbuchtextes und begleitende Unterrichtserprobung durch Wiesner, Engelhardt und Hoffmann.

Parallel dazu wurden Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten (Mittelstufenschüler bis Physikstudierende) untersucht und dafür geeignete Erhebungsmethoden entwickelt. Entsprechend der Ideen des Design-Based Research ist ein wesentlicher Schritt die präzise Beschreibung des zu lösenden Problems: Wo liegen die Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler, die in einer zu entwickelnden Lernumgebung beseitigt oder reduziert werden sollen?

Anfang der 1970er begann die Frankfurter Arbeitsgruppe, neben schriftlichen Befragungen mit Assoziationstests die kognitive Struktur von Schülerinnen und Schülern zu untersuchen. Die Assoziationstests wurden zu Paarbeziehungstests erweitert (Hoffmann et al., 1975). Eine besonders gut geeignete Untersuchungsmethode ist die von Jung und Wiesner Mitte der 1980er entwickelte Akzeptanzbefragung, die heute als „Teaching Experiments“ bezeichnet wird: Ein Erklärungsangebot wird auf verschiedene Weise auf Akzeptanz und Verständnis geprüft (Jung, 1992; Wiesner, 1993). Damit gelingt es sehr effektiv den Hintergrund von Lernhemmungen aufzudecken, aber auch herauszufinden, welche Lernangebote zugänglich sind. Die Methode der Akzeptanzbefragungen wurde in fast allen Inhaltbereichen angewendet und mit ihr eine Fülle neuer und grundlegender Einsichten in Lernprobleme erhalten. In zwei umfangreichen Forschungsprojekten zur Mechanik war die Methode der Akzeptanzbefragungen das Hauptinstrument (Jung, Wiesner, Blumör und Spill (1992), Wodzinski (1996)).

Die Erstellung eines praxisrelevanten Konzeptes einschließlich Materialien und gleichzeitig Grundlagenforschung zum Lernen von Physik und zu geeigneten Erhebungsinstrumenten ist typisch für Design-Based Research.

### **Vorausgehender Zyklus in Frankfurt: Das Kraftstoßkonzept von Wiesner**

Ab 1985 wurde das Stoßratenkonzept von Wiesner zum Kraftstoßkonzept weiterentwickelt. Hier wurde auf die eigenständige Größe Stoß und auf die Stoßrate verzichtet. Auch die För-

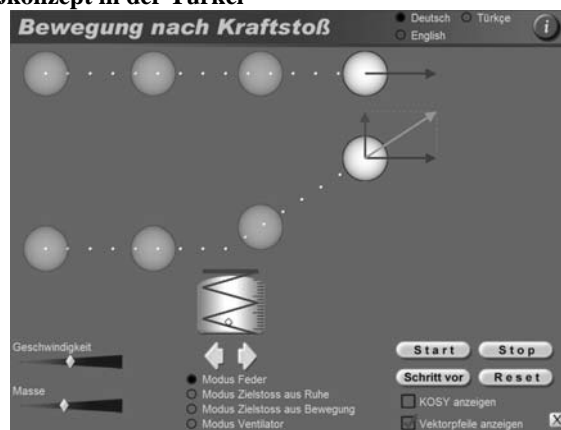
derbandanalogie mit dem anspruchsvollen Bezugssystemwechsel entfiel. Die Änderung bestand im Wesentlichen im Ersetzen des Stoßes durch den Kraftstoß als Produkt von Einwirkungsstärke (inklusive Einwirkungsrichtung) und Einwirkungszeit (die auch länger als bei einem kurzzeitigen Stoß im Alltagsverständnis sein kann). Damit bekam die grundlegende Gleichung zur Definition der Kraft die Form  $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$  (elementarisierte integrale Form des zweiten newtonschen Axioms). Dieses Unterrichtskonzept wurde mehrfach (von Wiesner, Spill, Herdt, Engelhardt und Wodzinski) in 10. Klassen in Frankfurt unterrichtet und es funktionierte nach den Testergebnissen sehr gut (z.B. Wiesner, 1992, 1994 a+b; Wodzinski & Wiesner 1994 a-c).

### Vorausgehender Zyklus: Kraftstoßkonzept in der Türkei

Schließlich hat Sen (Hacettepe-Universität Ankara) den Ansatz aufgegriffen und an die türkischen Rahmenbedingungen angepasst. Er hielt in Ankara Unterricht in der zehnten Jahrgangsstufe und führte eine empirische Vergleichsuntersuchung mit Kontroll- und Treatmentgruppe mit sehr gutem Erfolg durch (Hopf, Sen et al., 2008). Hier wurde erstmals eine Simulationssoftware für den senkrechten Stoß als Ergänzung zu entsprechenden Experimenten eingesetzt.

Man sieht, dass aus der Anfangsgeschwindigkeit (Pfeil nach rechts) und er Zusatzgeschwindigkeit (Pfeil nach oben) die Endgeschwindigkeit entsteht (Pfeil schräg).

Allen Studien bisher ist gemeinsam, dass sie abgesehen von Stroboskopbildern keine Messmöglichkeiten für zweidimensionale Bewegungen hatten. Stroboskopbilder waren aber nicht so einfach zu erstellen und wurden deshalb z.T. gezeichnet. U.a. aus diesem Grunde wurden meist Bewegungen betrachtet, die außerhalb eines Stoßes abschnittsweise geradlinig waren.



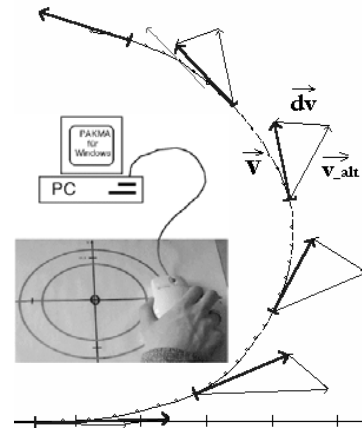
### Vorausgehender Zyklus in Würzburg: Die PC-Maus zur Messwerterfassung

Der Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität Würzburg war einer der ersten, der sich mit dem Einsatz des Computers im Physikunterricht beschäftigt hat. So wurde eine Soft- und Hardware für den Commodore C64 (Heuer, 1988), den Amiga (Heuer, 1992), den Windows-PC (Heuer, 2003) und schließlich betriebssystemunabhängig unter Java (Schönberger, 2002) erstellt. Die Software für den Windows-PC hatte außerdem die Möglichkeit, gemessene und berechnete Größen dynamisch in Echtzeit in Animationen darzustellen. Physikalische Größen und ihre Zusammenhänge können so mit piktogrammartigen Darstellungen wie Säulen, Vektoren und Verbindungslinien dargestellt werden, deren Aussagen leicht zu erfassen sind. Sie wurden als „dynamisch ikonische Repräsentationen“ bezeichnet (Heuer, 1996; Heuer & Wilhelm, 2003) und erstmals 1994 im Unterricht eingesetzt (Wilhelm, 1994, Wilhelm & Heuer, 1995).

Reusch und Heuer haben sich in den Jahren 1995 bis 2000 damit beschäftigt, zweidimensionale Bewegungen der PC-Maus auf dem Tisch mit der Software PAKMA zu erfassen und daraus die verschiedenen kinematischen Größen zu errechnen (Reusch, Gößwein et al., 2000). Diese Bewegung mit den kinematischen Größen wurde dann dynamisch am Bildschirm in Echtzeit mit Vektorpfeilen visualisiert. Auch hier wurde die Geschwindigkeitsän-

derung  $\Delta \vec{v}$  betont und damit die Beschleunigung erarbeitet. Durch die kontinuierliche Messung ist auch eine kontinuierliche Betrachtung möglich anstatt nur die eines einzigen Stoßes.

Reusch hat einen Unterricht entworfen, der in der Sekundarstufe II (11. Jahrgangsstufe) beim Thema „zweidimensionale Bewegung“ eingesetzt wurde, nachdem alle Größen vorher traditionell eindimensional eingeführt waren (Reusch & Heuer, 1998). Dabei wurden positive Unterrichtserfahrungen gemacht und eine wissenschaftliche Evaluation durchgeführt, deren Ergebnisse nur teilweise veröffentlicht wurden (Reusch & Heuer, 1999). Allerdings fehlte die Erstellung von Lehrmaterialien.



### Vorausgehender Zyklus in Würzburg: Das Oberstufenkonzept von Wilhelm

Wilhelm hat in den Jahren 2000 bis 2005 ein Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe II (11. Jahrgangsstufe) entwickelt, erprobt, von vielen Lehrern durchführen lassen und evaluiert. Eine Leitidee war, verschiedene Darstellungsformen für die Darstellung physikalischer Größen und ihrer Zusammenhänge zu nutzen (verschiedene Codierungen). Auf das Wesentliche reduzierte Animationen wurden auf dem Bildschirm gleichzeitig mit der Messung dargestellt. Physikalische Größen und ihre Zusammenhänge wurden dann mit piktogramm-artigen Darstellungen wie Vektorpfeilen visualisiert. Hier wurde allerdings im Mechanikunterricht gleich mit allgemeinen zweidimensionalen Bewegungen begonnen und die kinematischen Größen daran eingeführt (Wilhelm & Heuer, 2002 a+b, 2004; Wilhelm, 2005, 2008). Erst danach wurde dies auf eindimensionale Bewegungen spezialisiert. Als Messmöglichkeit diente wieder die PC-Maus (Wilhelm, 2006).

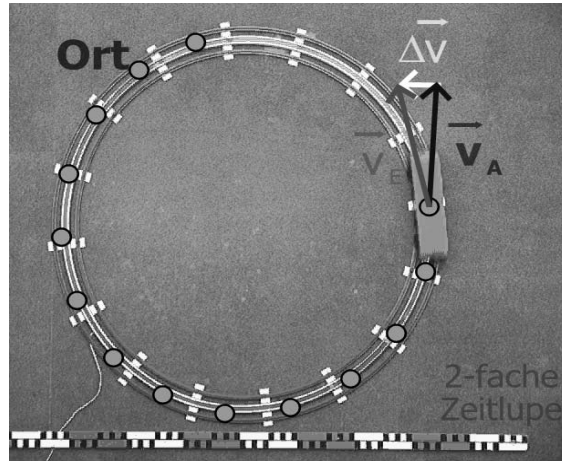
Während der Evaluation haben insgesamt 13 Lehrer in 17 Klassen nach diesem Konzept unterrichtet. Für die teilnehmenden Lehrer wurde ein Vorbereitungs- bzw. Begleit-Seminar zu diesem Unterrichtskonzept angeboten. Außerdem erhielten die Lehrer sehr umfangreiche Unterrichtsmaterialien, wie eine Unterrichtsbeschreibung, Arbeitsblätter, Videos, Messprogramme, Simulationen – auf einer CD und in einem Ordner mit über 200 Seiten. Die Evaluation zeigte, dass die Schüler qualitative Verständnisaufgaben besser lösen konnten. Bei den Aufgaben zur Grapheninterpretation eindimensionaler Bewegungen gab es dagegen kaum Unterschiede (Wilhelm, 2005, 2008).

### Vorausgehender Zyklus in Würzburg: Anpassung an die Jahrgangsstufe 7

Im Jahr 2007 erfolgte durch Schüler eine Anpassung der bisher dargestellten Konzepte an den neuen Lehrplan der 7. Jahrgangsstufe des achtjährigen Gymnasiums in Bayern (Schüller & Wilhelm, 2008). Im Wesentlichen wurde hierfür das Wiesnersche Kraftstoßkonzept mit den dynamischen Darstellungen von Wilhelm verwendet. Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass die Schüler selbst aktiv beteiligt sind. Außerdem wurden verschiedenste Medien vom Spielzeug bis zu Videos und Simulationen eingesetzt. In den Videos der Spielzeuge wurde die Geschwindigkeit mit einem Pfeil an dem bewegten Objekt dargestellt, was aber mit der verwendeten Software nicht einfach zu erstellen war und die Notwendigkeit einer entsprechenden Software zur Videoanalyse und Videopräsentation zeigte. Auch hier wurden für Lehrkräfte eine Unterrichtsbeschreibung und viele Materialien erstellt, aber keine umfangreiche wissenschaftliche Evaluation durchgeführt. Die Testergebnisse der Kurzevaluation ergaben dennoch sehr positive Ergebnisse, z.T. waren die Siebtklässler besser als herkömmlich unterrichtete Gymnasiasten in der 11. Jahrgangsstufe. Auch die Unterrichtserfahrungen waren positiv und es gab viel Interesse von anderen Lehrkräften.

### Vorausgehender Zyklus in Würzburg: Videoanalyse von Suleder

Ein weiterer Meilenstein war die Programmierung und anschließende Verbesserung der Videoanalysesoftware „measure dynamics“ durch Michael Suleder (Benz, 2008; Wilhelm, 2011), da die Erstellung eines digitalen Videos einer zweidimensionalen Bewegung heute kein Problem mehr darstellt. Die automatische Erfassung des bewegten Objektes im Video ist für den Unterricht eine erheblicher Vorteil. Auch Stroboskopbilder werden nun schnell auf Knopfdruck aus dem Video erstellt. Geschwindigkeits- und Beschleunigungspfeile können auf Knopfdruck im Video eingeblendet werden. Wichtig ist,



dass die Software für spezielle Wünsche offen ist. So können z.B. die Geschwindigkeit  $\bar{v}_{alt}$  eines früheren Messintervalls, die Geschwindigkeit  $\bar{v}_{neu}$  eines späteres Messintervalls und die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta\bar{v}$  eingezeichnet werden. Alle dynamischen Darstellungen (dynamisch ikonischen Repräsentationen) können nach Wunsch einfach zu- und abgeschaltet werden oder auch gestempelt werden (d.h. es bleiben Darstellungen früherer Zeitpunkte sichtbar). Da alle Einstellungen mit allen Darstellungen und Daten als ein „Projekt“ abgespeichert werden können, können Lehrkräfte ohne Vorarbeiten ein solches Projekt unmittelbar im Unterricht öffnen und einsetzen. Dann kann die Software ohne erneute Analyse das Video gleich mit allen voreingestellten Repräsentationen darstellen. Und schließlich kann das Video auch mit den dynamisch ikonischen Repräsentationen als avi-Datei exportiert werden und so von jedermann ohne die Originalsoftware verwendet und als Lehrvideo gezeigt werden (Michel, 2008). Zu dieser Videoanalysesoftware wurden inzwischen viele Lehrerfortbildungen durchgeführt und damit auch der Vorteil einer zweidimensionalen Einführung in die Mechanik gezeigt. Die Möglichkeiten der Videoanalyse wurde außerdem in einem Lehrerhandbuch (Suleder, 2010) dargelegt. Allerdings fand keine empirische Forschung mit Schülern statt.

Die Würzburger Vorarbeiten bestehen ebenfalls aus theoriebasierter Entwicklung eines praxisrelevanten Konzeptes, dessen Erprobung und z.T. einer empirischen Evaluation der Ergebnisse. Ihnen fehlt aber im Gegensatz zu den Frankfurter Zyklen die prozessbegleitende Grundlagenforschung zum Denken der Lernenden und zu geeigneten Erhebungsinstrumenten. Gerade diese prozessbegleitende Forschung ist typisch für Design-Based Research und ein Unterschied zu reiner Evaluationsforschung.

### Das Mechanikkonzept für die siebte Jahrgangsstufe

Das Mechanikkonzept wurde zunächst auf den Lehrplan für die siebte Jahrgangsstufe des bayerischen achtjährigen Gymnasium ausgerichtet. Laut diesem Lehrplan lernen die Schüler innerhalb von ca. 22 Unterrichtsstunden die grundlegenden kinematischen Größen kennen. Die Kraft wird dabei als Ursache für Bewegungsänderungen eingeführt sowie als Pfeil dargestellt und die drei newtonschen Axiome werden behandelt und angewandt. Quantitatives Rechnen und Grapheninterpretation bei eindimensionalen Bewegungen sind dagegen für die neunte Jahrgangsstufe vorgesehen.

Hierfür wurde im Rahmen des „Design-Based Research“-Ansatzes die Sachstruktur der vorausgehenden Zyklen weiterentwickelt und angepasst. Allen Vorarbeiten gemeinsam ist,

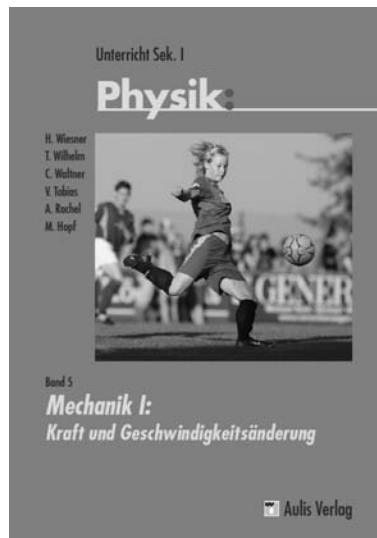


dass vor allem zweidimensionale Bewegungen betrachtet werden, die vektorielle Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  (= Geschwindigkeitsänderung) betont wird und der Kraftbegriff dynamisch eingeführt wird. Zurzeit wird aber üblicherweise anhand eindimensionaler Bewegungen Geschwindigkeit und Beschleunigung eingeführt, wofür in der Regel nur sehr wenig Unterrichtszeit verwendet wird. Danach wird schnell zu den Newtonschen Gesetzen übergeleitet, um dann spezielle Kraftarten zu betrachten. Zum Teil werden dabei von den Lehrkräften noch viele statische Aspekte mit unterrichtet.

In dem entwickelten Konzept wird mit der Beschreibung allgemeiner zweidimensionaler Bewegungen begonnen. Dann wird das Tempo eines Körpers behandelt und seine Bewegungsrichtung thematisiert. Beides zusammen bildet dann die Geschwindigkeit als vektorielle Größe, die immer mit einem Pfeil dargestellt wird. Hier ist eine digitale Videoanalyse von Bewegungen hilfreich, wenn die Software automatisch die Geschwindigkeitspfeile in das Video einblenden kann (wie in „measure dynamics“). Die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  wird als eigenständige Größe eingeführt und dient als Elementarisierung der - nicht explizit eingeführten - Beschleunigung. Das zweite newtonsche Axiom wird dann in der integralen Form  $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v}$  eingeführt. Diese Produktform ermöglicht den Lernenden, plausible Jedesto-Beziehungen zu formulieren, die den Schülern kaum Schwierigkeiten bereiten. Die Statik wird nur als Spezialfall der Dynamik am Ende erwähnt, bei der sich alle Kräfte kompensieren.

### Unterrichtsmaterialien

Zu dem Unterrichtskonzept wurde ein Lehrtext im Stil eines normalen Schulbuches erstellt (Hopf, Tobias et al., 2009). Eine Vergleichsstudie von Schulbüchern (Wilhelm & Kneisel, 2011) ergab, dass dieses Schulbuch im Gegensatz zu den Schulbüchern der Schulbuchverlage einen besseren Lesbarkeitswert hat, kaum Diagramme und Tabellen und keine mathematisch-rechnerischen Aufgaben enthält, aber den höchsten Anteil an Aufgaben, die an die Lebenswelt der Schüler anknüpfen - vor allem aus dem Bereich Sport. Für dieses Schulbuch mussten auch neue Experimentiervorschläge erarbeitet werden. Außerdem erhielten die Lehrkräfte eine DVD mit Arbeitsblättern, Videoaufnahmen, passenden Videoanalysen zu „measure dynamics“ sowie das passende Simulationsprogramm zum senkrechten Stoß, das bereits von Sen in der Türkei eingesetzt wurde. Mittlerweile wurde das Konzept in einem weiteren Lehrerhandbuch beschrieben und begründet, das im Aulis-Verlag veröffentlicht wird (Wiesner et al., 2011). Diesem Buch liegt ebenso eine DVD mit umfangreichen Unterrichtsmaterialien bei.



### Design der Studie

In der Hauptstudie unterrichten im Raum München die gleichen zehn Lehrkräfte in zwei verschiedenen Jahren zur gleichen Jahreszeit an der jeweils gleichen Schule zweimal die Einführung in die Mechanik: Zunächst in der Kontrollgruppe (Sommer 2008) und dann im Folgejahr in der Treatmentgruppe (Sommer 2009). Dafür wurden Tests und die umfangreichen Materialien entwickelt. Um diese Materialien vorher zu testen und festzustellen, was noch fehlt, erprobten im Herbst 2008 in einer Vorstudie 14 Lehrkräfte in 19 Klassen die Lehrermaterialien und das Schülerbuch in Unterfranken (Wilhelm et al., 2009). Dieser Test-

zyklus führte ganz im Sinne von Design-Based Research zu einer weiteren Verbesserung der Materialien. Auch die Hauptstudie führte entsprechend nochmals zu einer Verbesserung der Materialien, die in einer Nachfolgestudie genutzt wurden. In dieser unterrichteten nochmals acht Lehrkräfte in Kontrollgruppe (2009) und Treatmentgruppe (Frühjahr 2010). So kann die Gesamtstudie in eine Vorstudie, eine Hauptstudie und eine Nachfolgestudie aufgeteilt werden.

2008:												
1	2	3	4	Kontrollgruppe1	8	9	10	11	12			
Fragebögen				Materialienentwicklung		Schulung Erprobungsgruppe						
2009:												
1	2	3	4	Treatmentgruppe1	8	9	10	11	12			
Materialienverbesserung				Kontrollgruppe2		Materialienverbesserung1						12
2010:												
1	Treatmentgruppe2			5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2	3	4	5	Ergebnisveröffentlichung							

In der Hauptstudie bestand die Kontrollgruppe, die nach traditionellem Konzept unterrichtet wurde, aus 14 Klassen mit 358 Schülern. Die Treatmentgruppe, die nach dem zweidimensional-dynamischen Konzept unterrichtet wurde, bestand aus 13 Klassen mit 367 Schülern. Sowohl in Haupt- als auch in Nachfolgestudie erhielten die teilnehmenden Lehrkräfte im Rahmen eines an einem Nachmittag stattfindenden Treffen Informationen und die Materialien, aber keine wirkliche Schulung (im Gegensatz zur Vorstudie). Dieses Vorgehen wurde gewählt, da bei einem späteren Einsatz des Konzeptes in der breiten Anwendung auch keine flächendeckende Lehrerfortbildung möglich ist.

An Forschungsmethoden wurde ein Mix aus quantitativen und qualitativen Methoden gewählt. An quantitativen Forschungsmethoden wurde ein fachlicher Verständnistest eingesetzt sowie Tests zum fachspezifischen Selbstkonzept, zum Interesse am Physikunterricht und zur Selbstwirksamkeitserwartung (Wilhelm et al., 2009). Hierzu wurde in allen Gruppen jeweils ein Prätest vor dem Unterricht, ein Posttest nach dem Unterricht und ein FollowUp-Test nach drei Monaten durchgeführt. An qualitativen Forschungsmethoden wurden Lehrerinterviews und Schülerinterviews als halbstrukturierte Leitfadeninterviews eingesetzt sowie die Videoanalyse einer ausgewählten Unterrichtsstunde. Außerdem führten die Lehrkräfte ein Unterrichtstagebuch. Die detaillierte Beschreibung und Diskussion der Forschungsergebnisse findet sich in Tobias (2010), ein Teilbericht in Tobias et al. (2009, 2010) und in Wilhelm et al. (2011).

### Qualitative Ergebnisse

Sowohl in der Kontroll- als auch in der Treatmentgruppe konnte festgestellt werden, dass der Unterricht an den Lehrmitteln orientiert ist, d.h. an den gängigen Schulbüchern bzw. an dem Lehrtext, der in der Treatmentgruppe als Schulbuchersatz ausgehändigt worden war. In der Treatmentgruppe kann die unterrichtliche Umsetzung nach den Inhalten und deren Reihenfolge damit als konzepttreu gelten. So kann festgehalten werden, dass die Materialbereitstellung ein effektives Mittel bei der Implementation darstellt, da die Lehrpersonen sich bei der unterrichtlichen Umsetzung an den verfügbaren Büchern orientieren.

Von Tobias und Jetzinger wurden mit 52 Schülerinnen und Schülern (je vier zufällig ausgewählte Schülerinnen und Schüler aus den 13 Klassen der Treatmentgruppe) Interviews zu Zusatzgeschwindigkeit und Kraft sowie dem Umgang mit der Newtonschen Bewegungsgleichung durchgeführt (Jetzinger et al., 2010; Tobias, 2010). Diese Schülerinterviews ergaben, dass die Beschreibung von Bewegungen durch den vektoriellen Geschwindigkeitsbegriff mit den Aspekten Tempo und Richtung den Lernenden keine Schwierigkeit bereitet. Auch die Darstellung dieser Aspekte durch die Länge und die Richtung des Geschwindigkeitspfeils kann angegeben und angewendet werden. Selbst Transfer-/Anwendungsprobleme wurden

sehr gut gelöst. Auf einer qualitativen Ebene sind die Zusammenhänge von Kraft, Masse, Einwirkdauer und Zusatzgeschwindigkeit von fast allen Lernenden verstanden worden. Sie wissen, wie die Zusatzgeschwindigkeit von den anderen Größen abhängt und dass die Anfangs- sowie die Zusatzgeschwindigkeit zur Endgeschwindigkeit beitragen. Obwohl nur relativ wenige Lernende die Newtonsche Bewegungsgleichung in der integralen Form wiedergeben können, gelingt die argumentative Anwendung recht gut. Auf einer quantitativen Ebene sind die Konstruktionen von Endgeschwindigkeit (aus Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit) und Zusatzgeschwindigkeit (aus Anfangs- und Endgeschwindigkeit) etwa durch die Hälfte der Lernenden anwendbar.

### **Ergebnisse im Verständnistest der Hauptstudie**

Um das Verständnis der Schüler für die Begriffe Geschwindigkeit und Kraft zu überprüfen, wurden 17 qualitative Verständnisaufgaben eingesetzt. Die Items waren so, dass sie von den Lehrkräften als sinnvoll akzeptiert wurden. Hierzu wurde auf Items zurückgegriffen, die sich bereits in anderen Studien bewährt haben und von denen bayerische Vergleichswerte vorliegen (z.B. Schüller, 2008). 13 Items passen zu beiden Unterrichtskonzepten, da sie ein Grundverständnis abprüfen. Zwei Items passen nur zur neuen Sachstruktur, da sie den Begriff „Zusatzgeschwindigkeit“ enthalten. Zwei Items thematisieren dagegen die Beschleunigung, die nur im Unterricht nach dem traditionellen Konzept unterrichtet wird. Im Vortest waren jeweils keine signifikanten Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe feststellbar.

Erwartungsgemäß ist der Einfluss der Gruppe bei den beiden Aufgaben zum neueren Konzept höchst signifikant mit großer Effektstärke ( $d = 1,30$ ); die Ideen kamen also bei den Schülern der Treatmentgruppe an (Tobias, 2010). Überraschenderweise ist allerdings umgekehrt bei den beiden Aufgaben zum herkömmlichen Konzept kein signifikanter Unterschied nachweisbar; diese Inhalte zur Beschleunigung werden in beiden Gruppen gleich schlecht angeeignet. Bei den vergleichbaren 13 Aufgaben zum Grundverständnis, die für beide Gruppen fair waren, ergibt sich zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe auch ein höchst signifikanter Unterschied mit mittlerer Effektstärke ( $d = 0,56$ ). D.h. durch den Unterricht nach zweidimensional-dynamischem Lehrgang wurde ein höchst signifikant besserer Lernerfolg erreicht.

In Kontroll- und Treatmentgruppe sind die Jungen erwartungsgemäß den Mädchen im Vorwissen hoch bzw. höchst signifikant überlegen. Diese Unterschiede bleiben in der Kontrollgruppe bestehen oder wachsen sogar an. In Treatmentgruppe gibt es dagegen nach dem Unterricht keine signifikanten Unterschiede mehr, die Mädchen holen also erfreulicherweise auf. Woran dies liegt, müsste noch untersucht werden.

Im Lehrerinterview wurde festgestellt, wie viele Lernschwierigkeiten in der Mechanik die einzelnen Lehrkräfte kennen (Tobias, 2010). Dies ist ein Aspekt von fachdidaktischem Wissen (Pedagogical Content Knowledge PCK). In der Kontrollgruppe korreliert diese Anzahl wie erwartet positiv mit dem Lernerfolg, d.h. die Schülerinnen und Schüler von Lehrkräften mit hohen Kenntnissen zeigen auch mehr Verständnis. Diesen Zusammenhang zwischen fachdidaktischem Wissen und Schülerleistungen zeigen auch andere Studien, wie die CO-AKTIV-Studie (Krauss et al., 2008, Baumert et al., 2010) oder die PLUS-Studie (Lange, 2012). Überraschenderweise lag aber in der Treatmentgruppe kein Zusammenhang vor, d.h. diese Kenntnisse der Lehrkräfte spielen für das Verständnis der Lernenden keine Rolle. Hier kann man vermuten, dass die Implikationen dieses fachdidaktischen Wissens bereits in den Materialien enthalten sind und Lehrkräfte, die danach unterrichten, sich so verhalten, als hätten sie dieses fachdidaktische Wissen.

Das erwartete Ergebnis, dass die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden ein Prädiktor für den Lernerfolg ist, konnte lediglich in der Treatmentgruppe festgestellt werden. In der Kontrollgruppe lag dieser Zusammenhang erstaunlicherweise nicht vor; mehr Unterrichtszeit führte

nicht zu besseren Schülerergebnissen. Nur in der Treatmentgruppe korreliert die Anzahl gehaltener Unterrichtsstunden mit dem Lernerfolg; mehr Unterrichtszeit führte zu besseren Schülerergebnissen.

### **Ergebnisse im Verständnistest der Nachfolgestudie**

In der Nachfolgestudie wurde die Hauptstudie nochmals mit fünf anderen Lehrkräften wiederholt. Dabei ließen sich die Ergebnisse des Verständnistests gut reproduzieren. Die Lernenden schnitten hier sogar noch deutlich besser ab. Dies könnte an dem Einfluss der weiter verbesserten Materialien liegen, aber auch an der anderen gewählten Jahreszeit.

Außerdem gab es drei Lehrkräfte, die zum zweiten Mal nach dem Konzept unterrichteten. Auch bei ihnen waren die Schülerleistungen beim zweiten Mal hoch signifikant besser als beim ersten Mal. Dies könnte ebenso an den verbesserten Materialien liegen, an der anderen Jahreszeit oder an der größeren Erfahrung der Lehrkräfte mit dem Konzept.

### **Nicht-kognitive Merkmale**

Im Hinblick auf die nicht-kognitive Variable „Interesse“ konnten keine Effekte durch die Zugehörigkeit der Lernenden zur Kontroll- bzw. zur Treatmentgruppe festgestellt werden (Tobias, 2010). Die Hypothese, dass ein besseres fachliches Verständnis zu größerem Verständnis führt, konnte damit nicht bestätigt werden.

Im Hinblick auf die nicht-kognitive Variable „Selbstkonzept“ konnten bei Kontrolle unterschiedlicher Lernvoraussetzungen ebenso keine Effekte durch die Zugehörigkeit der Lernenden zur Kontroll- bzw. zur Treatmentgruppe festgestellt werden.

Allerdings gab es bei der Selbstwirksamkeitserwartung abhängig von der Art der Aufgabe signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe. Eine itemspezifische Analyse ergab, dass die Schülerinnen und Schüler der Treatmentgruppe sich selbst höchst signifikant kompetenter fühlen beim Einzeichnen einer Kraft, beim Vorhersagen einer Bewegung und beim Erklären einer Bewegung, was aus didaktischer Sicht wichtige Kompetenzen sind. Die Schülerinnen und Schüler der Kontrollgruppe fühlen sich dagegen selbst signifikant kompetenter beim Rechnen und beim Diagramme-Lesen. Beides sind aber keine Inhalte des Lehrplans, wurden aber wohl doch im herkömmlichen Unterricht behandelt. Qualitatives Verständnis werden von den Autoren hier am Beginn des Mechanikunterrichts für wichtiger angesehen.

### **Akzeptanz bei den Lehrkräften**

Nach den Erfahrungen im eigenen Unterricht konnte eine hervorragende Akzeptanz des zweidimensional-dynamischen Lehrgangs durch die Lehrpersonen erreicht werden. Zehn der zwölf Lehrkräfte der Vorstudie sowie alle zehn Lehrkräfte der Hauptstudie resümieren, dass sie das erprobte Konzept auch in Zukunft in ihrem Unterricht umsetzen. Die vektorielle Geschwindigkeit sowie die integrale Bewegungsgleichung wurden für sinnvoll und für verständlich gehalten, wobei die Bewertung beim ersten Punkt noch positiver war. Die Lehrpersonen sehen durch den Lehrgang Vorteile für das Verständnis der Schülerinnen und Schüler, insbesondere im Hinblick auf die Begriffsbildung von Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsänderung und Kraft. Einige Lehrkräfte fungierten an ihren Schulen bereits erfolgreich als Multiplikator.

Besonders diejenigen Lehrerinnen und Lehrer, welche eine gewisse Anzahl an konzeptionellen Lernschwierigkeiten in der Mechanik kennen, adaptieren das Konzept ohne Einschränkungen. Andere Lehrerinnen und Lehrer, die weniger konzeptionelle Lernschwierigkeiten in der Mechanik kennen, adaptieren das Konzept dagegen mit leichten Einschränkungen.

Die Gruppierung der Schülerinnen und Schüler entsprechend der Akzeptanz des Konzeptes mit und ohne Einschränkung durch die Lehrkräfte ergibt verschiedene Verläufe in den Nachtestergebnissen über die Messzeitpunkte: Im direkten Nachtest zeigt sich zunächst kein

Unterschied, aber im Follow-Up-Test schneiden die Schüler, deren Lehrkräfte das Konzept völlig akzeptieren, signifikant besser ab (kleine Effektstärke). So scheinen die Inhalte bei den Lehrerinnen und Lehrern nachhaltiger angeeignet zu werden, die das Konzept ohne Vorbehalte akzeptieren.

### **Fazit der Studie**

Das Unterrichtskonzept mit den entsprechenden Materialien liefert in der Treatmentgruppe signifikant mehr fachliches Verständnis bei den Lernenden. Insbesondere die Mädchen konnten aufholen, so dass die Überlegenheit der Jungen gegenüber Mädchen ausgeglichen wird. Diese Erfolge waren auch ohne richtige Lehrerschulung und ohne Lehrer-Coaching möglich, d.h. offenbar gelingt es mit diesen Materialien auch mit ganz kurzer Information für die Lehrkräfte, deutliche Effekte im Unterricht zu erzielen.

Das Konzept wird von Lehrpersonen stets teilweise oder vollständig akzeptiert. Der Grad der Akzeptanz des Konzeptes hängt von deren Kenntnissen von Lernschwierigkeiten ab. Allerdings hängt der Lernerfolg der Schüler direkt nach dem Unterricht nicht von dieser speziellen fachdidaktischen Kompetenzen ab.

Offen bleibt, wie stark der Einfluss von Erfahrungen der Lehrkräfte mit einem Konzept, also ihre Expertise, ist. Neue Forschungsfragen, die sich aus dieser Studie ergeben haben, sind auch, warum bei diesem Unterricht, der konsequent Schülervorstellungen berücksichtigt, Mädchen besser lernen. Eine andere Frage ist, ob es grundsätzlich wichtiger ist, dass Lehrkräfte Lernschwierigkeiten kennen oder dass sie fachdidaktische Alternativen kennen.

### **Was war an diesem Forschungsprojekt Design-Based Research?**

Insbesondere wenn man die vorausgehenden Zyklen mit bedenkt, kann das vorgestellte Forschungsprojekt als ein Projekt gemäß Design-Based Research betrachtet werden, bei dem ein praxisrelevantes Problem angegangen wurde und eine praxisrelevante Lösung geschaffen wurde. Theoriebasierte Entwicklung, Erprobung und empirische Evaluation fanden hier als langfristiger zyklischer Forschungsprozess statt, dessen einzelne Phasen immer einen Rückbezug auf vorangegangene Phasen beinhalten. Es wurden einerseits Lernumgebungen (multimedial und reale Experimente) und andererseits Forschungsinstrumente entwickelt. Die Entwicklung von Forschungsinstrumenten und die prozessbegleitende Grundlagenforschung zum Denken der Lernenden fand allerdings nicht in allen Vorarbeiten statt.

Insgesamt zeigte sich, dass neben der Beachtung der Ansätze des Conceptual Change die Entwicklung und Forschung in kontinuierlichen Zyklen aus Design, Umsetzung, Analyse und Re-Design sinnvoll ist. Dabei ist es am einfachsten und effektivsten, entsprechende Designs durch die Zusammenarbeit vieler Personen zu verwirklichen, um funktionierende Vorschläge für den Unterricht zu erarbeiten. Ein wesentlicher Aspekt dabei, der Design als Methode zur Veränderung der Schulpraxis von anderen ähnlichen Ansätzen unterscheidet, ist aber die fortdauernde Weiterentwicklung der entwickelten Lösungen. Designorientierte Entwicklung versucht, „Stolperstellen“ nach und nach auszumerzen, ohne die Grundintention zu verlieren und zudem immer weiter diejenigen Verbesserungen einzubauen, die sich im Alltagsgeschehen manchmal eher zufällig ergeben. Erst durch die Orientierung an Conceptual Change und durch diesen kontinuierlichen Zyklus von Design – Überprüfung – Re-Design gelingen nach einiger Zeit immer besser funktionierende Problemlösungen, die dann auch nachhaltigen Einfluss auf den Physikunterricht haben.

### **Literatur**

- Benz, M.; Wilhelm, T. (2008): measure Dynamics – Ein Quantensprung in der digitalen Videoanalyse. In: Nordmeier, V.; Grötzebach, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- Bereiter, C. (2002): Design Research for Sustained Innovation. In: Cognitive Studies, Bulletin of the Japanese Cognitive Science Society 9 (3), S. 321-327
- Baumert, J.; Kunter, M.; Blum, W.; Brunner, M.; Voss, T.; Jordan, A. et al. (2010). Teachers' mathematical knowledge, cognitive activation in the classroom, and student progress. In: American Educational Re-

- search Journal, 47(1), S. 133-180
- Burkhardt, H.; Schoenfeld, A. (2003): Improving educational research: Toward a more useful, more influential, and better funded enterprise. In: Educational Researcher 32, S. 3-14
- Chi, M. (2008): Three Types of Conceptual Change: Belief Revision, Mental Model Transformation and Categorical Shift. In: S. Vosniadou (Ed.): International Handbook of Research on conceptual Change, Routledge, S. 61-82
- Design-Based Research Collective (2003): design-based Research: an emerging paradigm for educational inquiry. In: Educational Researcher 32, S. 5-8
- diSessa, A. A. (1993): Toward an Epistemology of Physics. In: Cognition and Instruction 10, S. 105-225
- Fischer, F.; Waibel, M.; Wecker, C. (2005): Nutzenorientierte Grundlagenforschung im Bildungsbereich. Argumente einer internationalen Diskussion In: Zeitschrift für Erziehungswissenschaften 8, Heft 3, S. 427-442
- Hartmann, S. (2004): *Erklärungsvielfalt*, Studien zum Physiklernen, Band 37, Logos-Verlag, Berlin
- Heuer, D. (1988): Computer-Versuchs-Analyse, Messen und Analysieren von Versuchsabläufe mit der Programmierumgebung PAKMA - In: Kuhn, W. (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1988 Gießen, Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik, S. 304 - 309
- Heuer, D. (1992): Offene Programmierumgebung zum Messen, Analysieren und Modellieren. Ein Werkzeug, physikalische Kompetenz zu fördern - In: Physik in der Schule 30, Nr. 10, S. 352 – 357
- Heuer, D. (1996): Dynamische Repräsentationen. Verständnishilfe für Physikalische Experimente - In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 45, Nr. 4, S. 12 – 18
- Heuer, D. (2003): Physikunterricht, gestaltet mit Multimedia-Elementen - In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 52, Nr. 3, S. 2 – 15
- Heuer, D.; Wilhelm, T. (2003): Physikalische Abläufe verständlich machen durch Visualisierung von Struktur Aussagen mit Hilfe des Computers – In: Sauter, F. C.; Schneider, W.; Büttner, G. (Hrsg.): Schulwirklichkeit und Wissenschaft – Ausgewählte Kongressbeiträge von Didaktikern, Pädagogen, Psychologen, Verlag Dr. Kovač, Hamburg, S. 101 – 121
- Hoffmann, K.; Jung, W.; Wiesner, H. (1975): Welche Informationen liefern Assoziationen von Schülern für den Physikunterricht? In: Dahncke, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Hannover, S. 279-289
- Hopf, H.; Sen, A.; Waltner, C.; Wiesner, H. (2008): Dynamischer Zugang zur Mechanik. In: Nordmeier, V., Grötzebauch, H., (Hrsg.): Didaktik der Physik – Berlin 2008. Berlin: Lehmanns Media
- Hopf, M.; Tobias, V.; Waltner, C.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2009): Einführung in die Mechanik, München, Würzburg, 3. Auflage Dezember 2009, veröffentlicht unter: [www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt\\_materialien/mechanikkonzept/mechanik.pdf](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/mechanikkonzept/mechanik.pdf) und [www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/MechanikbuchAuflage3.pdf](http://www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm/veroeffentlichung/MechanikbuchAuflage3.pdf) und <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/111/224>
- Hopf, M.; Wiesner, H. (2007a): Paradigmen für physikdidaktische Forschung – ein Rück- und Ausblick: Physikdidaktik und Design-Based Research. In: St. Kolling (Hrsg.): Beiträge zur Experimentalphysik, Didaktik und computergestützten Physik. Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. Hans-Josef Pratt, Logos Verlag Berlin, S. 37-57
- Hopf, M.; Wiesner, H. (2007b): Design-Based Research. In: Nordmeier, V.; Oberländer, A.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- Hopf, M.; Wiesner, H. (2008): Design-Based Research. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung, Jahrestagung der GDCP in Essen 2007, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 28, Lit-Verlag, Münster, S. 68-70
- ISB (2011): Jahrgangsstufen-Lehrplan. Jahrgangsstufe 7. Natur und Technik. In: <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26436> (zuletzt abgerufen am 13.9.2011)
- Jetzinger, F.; Tobias, V.; Waltner, C.; Wiesner, H. (2010): Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie. In: Nordmeier V. (Red.): Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Didaktik der Physik
- Jung, W. (1977a): Wege in die Mechanik In: physica didactica 4, S. 219-229
- Jung, W. (1977b): Zur Einführung des Kraftbegriffs. In: physica didactica, S. 171-187
- Jung, W. (1979): Aufsätze zur Didaktik der Physik und Wissenschaftstheorie. Diesterweg, Frankfurt am Main
- Jung, W. (1980). Mechanik für die Sekundarstufe I. Diesterweg, Frankfurt am Main
- Jung, W. (1992): Probing Acceptance. A technique for investigating learning difficulties. In: R. Duit, F. Goldberg, H. Niedderer (Eds.): Research in Physics Learning. Theoretical Issues and Empirical Studies. Kiel, S. 278-295
- Jung, W.; Callsen, H. (1976): Newtonsche Mechanik. Versuch eines neuen Zugangs für den Unterricht. Naturwissenschaften im Unterricht 6/24, S. 231-236
- Jung, W.; Reul, H.; Schwedes, H. (1975): Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6. Diesterweg, Frankfurt am Main

- Jung, W.; Wiesner, H.; Spill, L.; Blumör, R. (1992): Lernprozesse in Mechanik. Abschlussbericht der DFG-Projekte Ju 150/4-1 und Ju 150/4-2, Frankfurt am Main
- Krauss, S.; Neubrand, M.; Blum, W.; Baumert, J.; Brunner, M.; Kunter, M.; Jordan, A. (2008). Die Untersuchung des professionellen Wissens deutscher Mathematik-Lehrerinnen und -Lehrer im Rahmen der CO-ACTIV-Studie. In: *Journal für Mathematikdidaktik*, 29(3/4), S. 223-258
- Lange, K. (2012): Die Bedeutung des fachdidaktischen Wissens von Lehrkräften für Lernfortschritte von Schülerinnen und Schülern im Sachunterricht der Grundschule. In: Vorstand der Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) (Hrsg.): *Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlegungen*, Waxmann
- Mandl, H.; Gruber, H.; Renkl, A. (1993a): Lernen im Physikunterricht - Brückenschlag zwischen wissenschaftlicher Theorie und menschlichen Erfahrungen - In: Kuhn, W. (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge Physikertagung 1993 Esslingen* (Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Fachausschuß Didaktik der Physik), S. 21 - 36
- Mandl, H.; Stark, R. (2001): Pasteur's quadrant in educational psychology: Use-inspired basic research to over-came the gap between theory and practice. Vortrag auf der AERA 2001, Seattle
- Michel, C.; Wilhelm, T. (2008): Lehrvideos mit dynamisch ikonischen Repräsentationen zu zweidimensionalen Bewegungen. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media, Berlin
- Prediger, S.; Link, M. (2012): Die Fachdidaktische Entwicklungsforschung – Ein lernprozessfokussierendes Forschungsprogramm mit Verschränkung fachdidaktischer Arbeitsbereiche. In: Vorstand der Gesellschaft für Fachdidaktik (GFD) (Hrsg.): *Formate Fachdidaktischer Forschung. Empirische Projekte – historische Analysen – theoretische Grundlegungen*, Waxmann
- Reiner, M.; Slotta, J. D.; Chi, M.; Resnick, L. (2000): Naive Physics Reasoning: A Commitment to Substance-Based Conceptions. In: *Cognition and Instruction* 18(1), S. 1-34
- Reinmann, G. (2005): Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. In: *Unterrichtswissenschaft* 33 (1), 52-69
- Reusch, W.; Gößwein, O.; Kahmann, C.; Heuer, D. (2000): Computerunterstützte Schülerversuche zur Mechanik mit der Computermaus als Low-Cost-Bewegungssensor. In: *Physik in der Schule* 38, Nr. 4, S. 269 – 273
- Reusch, W.; Heuer, D. (1998): Zweidimensionale Bewegungen – Unterrichtseinsatz mit Schülerversuchen - In: Behrendt, H. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Potsdam, September 1997*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDChP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 233 – 235
- Reusch, W.; Heuer, D. (1999): Förderung des Physiklernens durch Visualisierung und Interaktivität im Bereich der 2-dimensionalen Kinematik/Dynamik. In: Brechel, R. (Hrsg.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Essen, September 1998*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDChP), Leuchtturm-Verlag, Alsbach, S. 182 - 184
- Schönberger, S.; Heuer, D. (2002): JPAKMA – plattformunabhängige Modellbildung– In: Nordmeier, V. (Red.): *Didaktik der Physik. Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG Leipzig 2002*, Münster
- Schüller, F.; Wilhelm, T. (2008): Ein Unterrichtskonzept zur Mechanik in Jahrgangsstufe 7 – zweidimensional und multimedial. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Berlin 2008*, Lehmanns Media, Berlin
- Stark, R. (2004): Eine integrative Forschungsstrategie zur anwendungsbezogenen Generierung relevanten wissenschaftlichen Wissens in der Lehr- Lern-Forschung. In: *Unterrichtswissenschaft*, Heft 3/32, S. 257-273
- Stern, E. (2003): Kompetenzerwerb in anspruchsvollen Inhaltsgebieten bei Grundschulkindern. In: Cech, D.; Schwier, H.-J. (Hrsg.): *Lernwege und Aneignungsformen im Sachunterricht*. Klinkhardt, Bad Heilbrunn, S. 37-58
- Stokes, D. E. (1997): *Pasteur's Quadrant: Basic Science an Technological Innovation*. Washington
- Suleder, M. (2010): *Videoanalyse und Physikunterricht. Technik - Didaktik - Unterrichtspraxis*, Aulis-Verlag, Hallbergmoos
- Tobias, V. (2010): *Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen, Studien zum Physik- und Chemielernen*, Band 105, Logos-Verlag, Berlin
- Tobias, V.; Hopf, M.; Waltner, C.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2009): Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - qualitative Ergebnisse einer Befragung von Lehrkräften und SchülerInnen. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik - Bochum 2009*, Lehmanns Media, Berlin
- Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2010): Dynamischer Mechanikunterricht – Ergebnisse einer quantitativen Vergleichsstudie. In: Nordmeier, V. (Red.): *Beiträge zur Frühjahrstagung der DPG, Didaktik der Physik*

- Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2010): Sachstruktur im Mechanikunterricht – Wie gehen Lehrkräfte damit um? In: Höttecke D. (Red.): Beiträge zur Jahrestagung des GDCP, Dresden
- Vosniadou, S. (1994): Capturing and Modelling the Process of Conceptual Change. In: Learning and Instruction 4, S. 45-69
- Wiesner, H. (1992): Unterrichtsversuche zur Einführung in die Newtonsche Mechanik. In: Wiesner, H.: Verbesserung des Lernerfolgs durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten im Physikunterricht, Frankfurt/M., S. 261-272
- Wiesner, H. (1993) Verbesserung des Lernerfolgs durch Untersuchungen von Lernschwierigkeiten im Physikunterricht, Habilitationsschrift, Universität Frankfurt/M.
- Wiesner, H. (1994a): Zum Einführungsunterricht in die Newtonsche Mechanik: Statisch oder dynamisch? In: Naturwissenschaften im Unterricht, Heft 22, S. 16-23
- Wiesner, H. (1994b): Verbesserung des Lernerfolgs im Unterricht über Mechanik: Schülervorstellungen, Lernschwierigkeiten und fachdidaktische Folgerungen. In: Physik in der Schule, S. 122-126
- Wiesner, H.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wilhelm, T.; Sen, A. (2010): Dynamik in den Mechanikunterricht. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, www.phydid.de
- Wiesner, H.; Wilhelm, T.; Rachel, A.; Waltner, C.; Tobias, V.; Hopf, M. (2011): Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung. In: Reihe Unterricht Physik, Aulis-Verlag
- Wilhelm, T. (1994): Lernen der Dynamik geradliniger Bewegungen – Empirische Erhebungen und Vorschlag für ein neues Unterrichtskonzept, Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung für das Lehramt am Gymnasium, Universität Würzburg
- Wilhelm, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Dissertation, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, URN: urn:nbn:de:bvb:20-opus-39554, URL: <http://www.opus-bayern.de/uni-wuerzburg/volltexte/2009/3955/>
- Wilhelm, T. (2006): Zweidimensionale Bewegungen - Vergleich von vier verschiedenen Möglichkeiten der Messwerterfassung und Evaluationsergebnisse eines Unterrichtseinsatzes – In: Nordmeier, V.; Oberländer, A. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Kassel 2006, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- Wilhelm, T. (2008): Mechanik - zweidimensional und multimedial. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Berlin 2008, Lehmanns Media, Berlin
- Wilhelm, T. (2011): Möglichkeiten der Videoanalyse. Habilitationsschrift, Universität Würzburg
- Wilhelm, T.; Heuer, D. (1995): Lernen von Konzepten zur Dynamik - dynamische Physikrepräsentation am Computer zur Visualisierung. In: Behrendt, H. (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Freiburg i.Br., September 1994, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCP), Leuchtturm-Verlag, S. 163 – 165
- Wilhelm, T.; Heuer, D. (2002a): Fehlvorstellungen in der Kinematik vermeiden - durch Beginn mit der zweidimensionalen Bewegung. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51, Nr. 7, S. 29 – 34
- Wilhelm, T.; Heuer, D. (2002b): Interesse fördern, Fehlvorstellungen abbauen - dynamisch ikonische Repräsentationen in der Dynamik. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51, Nr. 8, S. 2 – 11
- Wilhelm, T.; Heuer, D. (2004): Experimente zum dritten Newtonschen Gesetz zur Veränderung von Schülervorstellungen. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 53, 2004, Nr. 3, S. 17 - 22
- Wilhelm, T.; Kneisel, S. (2011): Vergleich und Analyse der Sachstruktur von Gymnasialschulbüchern im Anfangsunterricht Mechanik. In: PhyDid-B - Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Münster, www.phydid.de
- Wilhelm, T.; Tobias, V.; Waltner, C.; Hopf, M.; Wiesner, H. (2011): Zweidimensional-dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung, Jahrestagung der GDCP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31, Lit-Verlag, Münster, S. 438 - 440
- Wilhelm, T.; Waltner, C.; Hopf, M.; Tobias, V.; Wiesner, H. (2009): Der Einfluss der Sachstruktur im Mechanikunterricht - quantitative Ergebnisse zur Verständnis- und Interessenentwicklung. In: Nordmeier, V.; Grötzebauch, H. (Hrsg.): Didaktik der Physik - Bochum 2009, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- Wilkening, F.; Lamsfuß, S. (1993): (Miß-)Konzepte der naiven Physik im Entwicklungsverlauf. In: Hell, W.; Fiedler, K.; Gigerenzer, G. (Eds.), Kognitive Täuschungen, Spektrum, Heidelberg, S. 271-290
- Wodzinski, R. (1996): Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht. Dissertation Universität Frankfurt am Main, LIT, Münster
- Wodzinski, R.; Wiesner, H. (1994a): Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen. In: Physik in der Schule, S. 164-168
- Wodzinski, R.; Wiesner, H. (1994b): Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung. In: Physik in der Schule, S. 202-207
- Wodzinski, R.; Wiesner, H. (1994c): Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Die Newtonsche Bewegungsgleichung in Anwendungen und Beispielen. In: Physik in der Schule, S. 331-335