

## Kapitel 5

### Alternative Konzepte des Mechanikunterrichts

Der Newtonsche Kraftbegriff ist bereits durch seine Theoriegebundenheit einer der schwierigsten Begriffe, der Schülern im Physikunterricht begegnet. Die Ergebnisse des letzten Abschnittes bestätigen ferner, dass das Erlernen des Begriffs durch ein aus Alltagserfahrungen und Alltagssprache resultierendes „intuitives“ Kraftverständnis erschwert wird.

Auch nach dem Mechanikunterricht steht das Trägheitsprinzip im Widerspruch zur Alltagserfahrung, dass zur Aufrechterhaltung einer konstanten Geschwindigkeit eine Kraft nötig ist. Das Wechselwirkungsprinzip im Widerspruch zu jeder sprachlichen Äußerung, bei der lediglich von einer Kraft die Rede ist. Letzteres gilt natürlich auch, wenn im Falle des Kräftegleichgewichtes von zwei Kräften gesprochen wird. Dem traditionellen Mechanikunterricht gelingt offensichtlich keine physikalisch tragfähige Begriffsbildung. Vielleicht ist der konventionelle Unterricht sogar kontraproduktiv und verstärkt die Schwierigkeiten, die er beheben soll. Einige Gründe, wie z. B. die Reduktion des Kraftbegriffes in der Sekundarstufe I auf die Statik, die damit verbundene Anknüpfung an das Muskelgefühl sowie die Vernachlässigung des Wechselwirkungsaspektes, wurden bereits vor vielen Jahren genannt [SPIL88]. Es wurden entsprechende Änderungen, die den „bewegungsändernden“ Wirkungen und dem Wechselwirkungskonzept mehr Aufmerksamkeit schenken, bei der Konzeption von Lehrbüchern vorgeschlagen [DUIT88].

Neben Alternativen, die nur leichte Umstellungen im üblichen Zugang zur Mechanik bedeuten, gibt es auch solche (z.B. in [JUNG81b]), die stärker in gewohnte Strukturen eingreifen.

„W. Jung hat beispielsweise eine konsequent an Bewegungsänderungen anknüpfende Einführung des Kraftbegriffs erarbeitet und in der Schulpraxis erprobt. Kraftwirkungen werden dabei in eine Folge von Kraftstößen aufgelöst. Durchgesetzt hat sich dieser interessante und fruchtbare Ansatz bislang nicht. Dies dürfte zwei Hauptgründe haben. Erstens weicht der Weg sehr stark vom Gewohnten ab und zweitens kann er auch nur in einem gänzlich neuen Aufbau der gesamten Mechanik sinnvoll realisiert werden.“ [DUIT88]

Im Folgenden soll ausführlich auf ein Konzept eingegangen werden, das in viel drastischerem Umfang mit dem Gewohnten bricht. Darüber hinaus wird es seit längerer Zeit in der Praxis eingesetzt.

## 5.1 Der Karlsruher Physikkurs

Der Karlsruher Physikkurs (KPK) ist eine sprachlich und inhaltlich grundlegend anders strukturierte Darstellung der Physik. Seit etwa 11 Jahren können in Baden-Württemberg Themen des Lehrplans der Mittelstufe sowie von Klasse 11 nach dem KPK unterrichtet werden. 1998 betraf das ca. 1500 Schüler und ca. 50 Lehrer [STAR98].

Physikalische Theorien lassen sich mittels unterschiedlicher Begriffe formulieren. Bekanntestes Beispiel sind die beiden Beschreibungen der Quantenmechanik nach Heisenberg („Matrizenmechanik“) und Schrödinger („Wellenmechanik“).

„Wegen der Verschiedenheit der Begriffe glaubte man zunächst verschiedene Theorien vor sich zu haben.“ ... „Seitdem (es Schrödinger gelang zu beweisen, das es sich um begrifflich unterschiedliche Fassungen derselben Theorie handelte) spricht man nur noch von verschiedenen Darstellungen derselben Theorie ..., weiß man, dass ... zwischen der inneren Struktur einer Theorie und der begrifflichen Fassung zu unterscheiden ist.“ [FALK79]

Das begriffliche Fundament des KPK bilden sogenannte mengenartige Größen. Zu ihnen gehören neben der Energie z.B. die Masse, der Impuls, der Drehimpuls, die elektrische Ladung, die Stoffmenge und die Entropie. Mengenartige Größen  $X$  sind bilanzierbare Größen, für die eine Dichte  $X/\text{Volumen}$  und eine Stromdichte  $\mathbf{j}_X$  (und damit eine Stromstärke  $I_X = dX/dt = \int_s \mathbf{j}_X d\mathbf{A}$ ) existieren ( $\int_s$  bezeichnet das Integral über die orientierte Fläche  $A$ ).

Kennzeichen für eine mengenartige Größe  $X$  ist somit ihr Auftreten in einer Kontinuitätsgleichung der Art

$$dX/dt = I_X + \Sigma_X.$$

Die Gleichung bezieht sich stets auf ein bestimmtes Raumgebiet. Die zeitliche Änderung  $dX/dt$  des Wertes von  $X$  im Innern des Raumgebietes setzt sich zusammen aus der Menge  $\Sigma_X$ , die ebenfalls im Innern des Raumgebietes erzeugt oder vernichtet wird und einem Zu- oder Wegstrom  $I_X$  durch die Oberfläche des Raumgebietes. Bezeichnet man den Ausdruck  $I_X$  in der Kontinuitätsgleichung als Stromstärke, darf man sich die mengenartige Größe  $X$  als eine Art Substanz oder Stoff vorstellen. Das liefert die Grundlage für die nah an der Umgangssprache angesiedelte Fachsprache des KPK [FALK79, HERR95].

„Die Tatsache, dass man über bestimmte Größen genauso sprechen darf wie über Stoffe, also z.B. wie über Wasser oder über Luft, ist für den Unterricht außerordentlich wichtig. Gewöhnlich muss man sich, wenn man eine neue physikalische Größe kennen lernt auch das verbale Umfeld dieser Größe aneignen: bestimmte Verben, Adjektive, Adverbien und Präpositionen. Bei der Formulierung von Sätzen, in denen z.B. die Größen Kraft, Arbeit oder Spannung vorkommen, hat

man nicht viel Spielraum: Eine Kraft wird auf einen Körper „ausgeübt“, oder sie „wirkt“, Arbeit wird „verrichtet“ und eine Spannung „herrscht“ oder „liegt an“. Beim Umgang mit mengenartigen Größen kann man sich dagegen aller umgangssprachlichen Wendungen bedienen, die man auch benutzt, um Stoffbilanzen zu formulieren. So kann man sagen: „ein Körper enthält eine bestimmte Menge Impuls“. – genauso aber auch „in dem Körper steckt Impuls“, „der Körper hat Impuls“ oder „es ist soundsoviel Impuls in dem Körper drin“. Auch darf man die Adverbien „viel“ und „wenig“ benutzen. Ein System kann viel oder wenig Energie haben“ ...

„Auch das „Fließen eines Stroms“ einer mengenartigen Größe lässt sich auf die verschiedensten Arten zum Ausdruck bringen. So kann man sagen, die elektrische Ladung „fließt“ oder „strömt“ von A nach B ... oder sie „verlässt“ A und „kommt in B an“... „Die Sprache, die hier verwendet wird, ist jedem Schüler vertraut, noch ehe er zum ersten mal Physikunterricht hat. Die Hervorhebung des Mengencharakters dieser Größen ist daher für den Unterricht sehr hilfreich.“ [HERR93b]

Für einige mengenartige Größen wie z.B. Energie  $E$ , Impuls  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ , Drehimpuls  $\mathbf{L} = (L_x, L_y, L_z)$  und elektrische Ladung  $Q$  verschwindet der Term  $\Sigma_X$ . Bei diesen Größen handelt es sich um Erhaltungsgrößen, damit kann sich ihr Wert im Innern eines Raumgebietes nur durch einen Strom durch die Oberfläche ändern. Bei den vektoriellen Größen Impuls und Drehimpuls lassen sich (bei festgehaltenem Koordinatensystem) die einzelnen Komponenten als skalare Erhaltungsgrößen auffassen. Die Entropie  $S$  ist dagegen ein Beispiel für eine mengenartige Größe, die lediglich einem „halben Erhaltungssatz“ genügt. Sie kann zwar erzeugt jedoch nicht vernichtet werden.

Eine weitere Motivation für den KPK ist der Versuch im Physikunterricht ein tragfähiges Begriffssystem einzuführen, das wesentliche Aussagen in vielen Teilbereichen der Physik erlaubt und auch die Physik des 20. Jahrhunderts mit einschließt. Bei der Begründung des KPK weist G. Falk darauf hin, dass die Fundamentalbegriffe des Newtonschen Aufbaus der Mechanik (Raum, Zeit, Masse und Kraft) gerade eine begriffliche Einheit von klassischer und moderner Physik verhindern, weil sie im Begriffssystem der Quantenmechanik keine zentrale Rolle spielen.

„Die grundlegende Idee der Quantenmechanik ist die, alle Naturvorgänge als Übergänge *zwischen Zuständen* physikalischer Systeme zu verstehen. Der *Zustand* ist deshalb ein zentraler Begriff der Theorie.“ (Hervorhebungen im Original) [FALK79]

Wichtigste Größe bei der Charakterisierung eines quantenmechanischen Zustands ist i. d. R. der Energieeigenwert des Systems. Daneben kommt z. B. bei Emmissions- oder Absorptionsprozessen den Größen Drehimpuls oder Impuls eine große Bedeutung zu. Die Beschreibung des Zustands eines Systems durch die Werte der das System charakterisierenden mengenartigen Standard-Größen  $X_i$  sowie von Zustandsänderungen durch die Differenzen

dieser Werte  $\Delta X_i$  in zwei Zuständen, entspricht einer in der Thermodynamik üblichen Beschreibungsweise. Sie wird im KPK zur Grundlage der Naturbeschreibung gemacht.

„Ein physikalisches System, ein ‚Objekt‘ wird nicht als gestaltlich geometrisches Gebilde aufgefasst, sondern als ein ‚Bündel‘ der Standard-Größen. Die Wertekombinationen dieser Größen, die ja die Zustände des Systems festlegen, sind für das System charakteristisch.“

und als Folgerung daraus:

„Bei jedem Übergang ändern mindestens *zwei* physikalische Größen ihren Wert.“ (Hervorh. im Original) [FALK79]

Sind alle vorkommenden physikalischen Größen stetige Variable und ihre Abhängigkeiten differenzierbare Funktionen dieser Variablen, lässt sich eine allgemeingültige mathematische Beziehung zwischen den Änderungen der mengenartigen Standard-Größen aufstellen. Die sog. *Gibbssche Fundamentalform*. Wählt man als eine der beiden sich ändernden mengenartigen Größen stets die Energie  $E$ , ergibt sich für den einfachsten infinitesimalen Übergang (d.h. es soll sich nur eine weitere Größe  $X_i$  ebenfalls ändern)

$$dE = \xi_i dX_i.$$

$\xi_i$  gibt dabei an, wie groß die mit  $dX_i$  verknüpfte Energieänderung ist. Allgemein gilt

$$dE = \xi_1 dX_1 + \xi_2 dX_2 + \xi_3 dX_3 + \dots \quad (1)$$

und bei Verwendung der o. g. Variablen bekommt die *Gibbssche Fundamentalform* die Gestalt

$$dE = \mathbf{v}d\mathbf{p} + \boldsymbol{\omega}d\mathbf{L} + TdS + \varphi dQ + \dots \quad (2)$$

Für die vektoriellen mengenartigen Größen Impuls und Drehimpuls bedeuten die Skalarprodukte  $\mathbf{v}d\mathbf{p} = v_x dp_x + v_y dp_y + v_z dp_z$ . bzw.  $\boldsymbol{\omega}d\mathbf{L} = \omega_x dL_x + \omega_y dL_y + \omega_z dL_z$ .

Beschreibt man nun die Energieänderungen  $\xi_i dX_i$  als einen Strom der Größe  $X_i$  in das betrachtete System hinein bzw. aus ihm heraus, so erlaubt Gl. 2 in der Form

$$dE/dt = \mathbf{v}(d\mathbf{p}/dt) + \boldsymbol{\omega}(d\mathbf{L}/dt) + T(dS/dt) + \varphi(dQ/dt) \quad (3)$$

eine Einteilung strömender Energie (= Leistung)  $dE/dt = P$  in Energieformen. Diese Systematik bringt Klarheit in die Sprachverwirrung, die üblicherweise in der Schulphysik herrscht, wenn es um die Einteilung der Energie in bestimmte Formen geht. Die Einteilung

der Energie in Formen ist eine Folge der historischen Entwicklung des Energiebegriffes und soll hier nicht im Einzelnen diskutiert werden. Von einigen Autoren wird heute die Ansicht vertreten, dass der Begriff der Energieform generell überflüssig geworden ist:

„Dass die Energie in verschiedenen Formen auftritt, gehört zum physikalischen Gemeinwissen. Kinetische, potentielle, elektrische, chemische Energie und Wärme sind jedermann geläufige Beispiele; die Umwandlung einer Form in eine andere ist eine stehende Redensart.“ ... „Obwohl wir ganz selbstverständlich von Energieformen sprechen, haben wir Mühe, sie zu definieren. Schon in der notwendigen Unterscheidung von Daseins- und Austauschformen der Energie sind wir nicht konsequent, im Gegenteil, wir neigen in saloppen Formulierungen dazu, sie gleichzusetzen. Während sich für die Abgrenzung der Austauschformen, etwa Wärme und verschiedene Arten der Arbeit, noch gewisse Regeln eingespielt haben, scheint die Einteilung der Daseinsformen außer bei einigen mechanischen Paradebeispielen vage und willkürlich. Welcher Anteil der Energie einer Stahlfeder oder einer Luftmolekel ist mechanisch, thermisch, chemisch, elektrisch oder magnetisch, welcher translatorisch, rotatorisch oszillatorisch oder elektronisch, welcher kinetisch oder potentiell, welcher geordnet oder ungeordnet? Dass man zu sinnvollen Ergebnissen gelangen kann, auch ohne diese Fragen genau beantworten zu können, lässt vermuten, dass die Einteilung physikalisch belanglos ist.“ [JOB94]

Die Fachsprache unterscheidet zunächst zwischen den beiden Kategorien Austausch- und Existenzformen der Energie. Existenzformen lassen sich zuordnen, wenn sich der Energieinhalt eines Systems als Summe des Energieinhaltes einzelner Teilsysteme beschreiben lässt. Z. B. werden die einzelnen Terme des Energieinhaltes eines sich bewegenden Kondensators

$$E(Q, \mathbf{p}) = E_0 + Q^2/2C + \mathbf{p}^2/2m$$

$Q$  := el. Ladung,  $C$  := Kapazität,  
 $\mathbf{p}$  := Impuls,  $m$  := Masse

dann als Ruhenergie ( $E_0$ ), elektrische Feldenergie ( $Q^2/2C$ ) und kinetische Energie ( $\mathbf{p}^2/2m$ ) bezeichnet.

Diese Aufteilung gespeicherter Energie in Energieformen (kinetische Energie, potentielle Energie, innere Energie) kann m. E. durchaus didaktisch hilfreich sein. Z.B. als Grundlage für die spätere Behandlung einfacher Differentialgleichungen (z. B. harmonischer Oszillator), für die molekularkinetische Theorie der Wärme (Zusammenhang zwischen innerer Energie und kinetischer Energie) oder der Einführung in die Quantenmechanik (Hamiltonfunktion).

Anders ist dies bei den Bezeichnungen für die Austauschformen der Energie. Bekanntlich kann ein System keine Energie in Form von Arbeit oder in Form von Wärme enthalten. Die feine fachsprachliche Unterscheidung, dass Arbeit vom oder am System verrichtet, bzw. Wärme vom System aufgenommen oder abgegeben wird drückt dies aus. Die sprachliche Inkonsistenz dieser Beschreibung ist insbesondere beim Begriff Wärme offensichtlich. Ein

System kann z. B. Wärme ( $dQ$ ) aufnehmen, seine innere Energie ( $dU$ ) erhöhen und anschließend Wärme abgeben ohne, dass dazwischen Wärme im System enthalten ist. D. h. ganz abgesehen von den Schwierigkeiten durch die umgangssprachliche Bedeutung des Wortes Wärme (Energie, Temperatur), baut die physikalische Begriffsstruktur hier zusätzliche Hürden auf, die selbst von vielen Physikstudenten höherer Semester nicht gemeistert werden. In der Sprache des KPK werden die Begriffe Arbeit und Wärme durch das Konzept der Energieströme überflüssig.

Betrachtet man Gl. 3 unter diesem Aspekt, erkennt man, dass ein Energiestrom  $P$  immer von (mindestens) einem weiteren Strom einer mengenartigen Größe begleitet ist. Verfügt man über einen Begriff für diese zweite Größe, bekommt der Energieaustausch eine einfache und anschauliche Struktur.

„Um die durch die verschiedenen Terme“ ... „charakterisierten Energietransporte zu unterscheiden, braucht man nicht von verschiedenen Formen der Energie zu sprechen; es genügt anzugeben, welche mengenartige Größe neben der Energie noch übertragen wird. Statt z. B. von Energie in Form von Wärme zu sprechen, sagt man einfach, dass neben dem Energiestrom noch ein Entropiestrom fließt.“ [HERR95]

Der Begriff Arbeit entspricht damit einem Energiestrom, der von einem Impuls- oder Drehimpulsstrom begleitet wird. Die den Energiestrom begleitende mengenartige Größe (hier  $p$  oder  $L$ ) wird in der Sprache des KPK als Energieträger bezeichnet.

„...legt nun darüber hinaus ein einfaches Bild für die Beschreibung eines Energietransports nahe: Wir nennen die einen Energiestrom begleitende mengenartige Größe den *Energieträger*. Die Energie wird also, bildlich gesprochen, getragen von Entropie, elektrischer Ladung, Impuls, Stoffmenge etc. Ein gegebener Trägerstrom kann, je nach dem Wert der entsprechenden intensiven Größe, mit einem kleineren oder größeren Energiestrom verknüpft sein. Wir sagen: Der Träger kann mit wenig oder viel Energie beladen sein. Die intensive Größe stellt damit ein *Maß für die Beladung des Trägers* mit Energie dar. In Geräten, die nach traditioneller Sprechweise Energiewandler heißen, wechselt die Energie einfach den Träger. Sie gelangt mit einem Träger in das Gerät hinein, wird dort auf einen anderen Träger umgeladen und verlässt das Gerät mit diesem anderen Träger.“ (Hervorhebungen im Original) [HERR95]

Die auf der rechten Seite von Gl. 3 stehenden Trägerströme lassen sich noch unter einem weiteren interessanten Aspekt betrachten. Jeder dieser Terme lässt sich einem der großen klassischen Teilgebiete der Physik zuordnen (vgl. *Tabelle 5.1.1* aus [HERR95] ). Daraus ergibt sich für die Schule die Möglichkeit einer deutlichen Reduzierung des Lehrstoffes, weil in ganz verschiedenen Bereichen der Physik mit den gleichen Anschauungen und Analogien gearbeitet werden kann.

|  | Extensive Größe                  | Stromstärke   | Intensive Größe                                   |
|--|----------------------------------|---|---|
| <b>Mechanik<br/>freier Massenpunkte<br/>starrer Körper</b> | Impuls $p$<br><br>Drehimpuls $L$ | Impulsstromstärke $I_p$<br>$= dp/dt$ (= Kraft $F$ )<br>Drehimpuls-<br>stromstärke $I_L$ | Geschwindigkeit $v$<br><br>Winkelgeschw. $\omega$ |
| <b>Elektrizitätslehre</b>                                  | elektrische Ladung $Q$           | elektrische<br>Stromstärke $I$  | elektrisches<br>Potential $\phi$                  |
| <b>Wärmelehre</b>  | Entropie $S$                     | Entropie-<br>stromstärke $I_S$  | Temperatur $T$                                    |

**Tabelle 5.1.1**

*Zuordnung physikalischer Größen zu Teilgebieten der Physik (aus [HERR95]).*

Die systematische Behandlung eines solchen Teilgebietes der Physik erfordert also neben der Energie immer mindestens eine weitere mengenartige Größe. Umgekehrt kommt man in Schwierigkeiten, wenn man versucht mit einer einzigen auszukommen.

„Die Darstellung eines solchen Teilgebiets wird nun immer dann problematisch, wenn man versucht, mit einer einzigen mengenartigen Größe auszukommen. Es hat lange gedauert, bis sich diese Einsicht durchgesetzt hat. So ging es in dem berühmten Streit zwischen Cartesianern und Leibnizianern über das wahre Kraftmaß in der Mechanik, in moderner Sprache ausgedrückt, um die Frage, ob der Impuls oder die kinetische Energie die „richtige“ Größe sei. Man ging davon aus, dass es nur eine von beiden sein könnte. Obwohl die beiden mengenartigen Größen der Thermodynamik, nämlich Energie und Entropie, schon seit mehr als 100 Jahren bekannt sind, macht man noch heute in der Lehre den Versuch, einen möglichst großen Teil der Thermodynamik ohne Zuhilfenahme der Entropie darzustellen. Diesem Umstand verdankt die traditionelle Wärmelehre ihren abschreckenden Aufbau. Eine solche Darstellung der Wärmelehre würde einer Elektrizitätslehre entsprechen, die ohne elektrische Ladung und ohne elektrische Stromstärke operiert ([Fuchs 1986]), oder einer Mechanik, in der es keinen Impuls und keine Kraft gibt.“ [HERR95]

Im KPK folgt darüber hinaus das Thema physikalische Chemie der in *Tabelle 5.1.1* angegebenen Struktur. Dort entspricht der zugehörigen mengenartigen extensiven Größe die Stoffmenge  $n$ , der Stromstärke die Stoffstromstärke  $I_n$  und der intensiven Größe das chemische Potential  $\mu$ .

Für die physikalischen Teilgebiete Optik, Akustik und Elektronik wird im KPK als bereichsübergreifende mengenartige Größe nicht die Energie, sondern die „Datenmenge“ (Shannonsche Information, Einheit bit) verwendet. Als „Datenträger“ fungieren Licht (Optik), Schall (Akustik) und Elektrizität (Elektronik).



Obwohl sich die Sprache aller Teilgebiete des KPK (Konzept von Strom, Antrieb und Widerstand) an der Elektrizitätslehre orientiert, wirkt sie ausgerechnet dort etwas holprig, da im KPK das Wort „Ladung“ durch das Wort „Elektrizität“ ersetzt wird, damit die Ladungsträger bzw. ihre Vorzeichen nicht gleich zu Anfang thematisiert werden. Es entsteht damit der etwas kuriose Zusammenhang, dass die Energie im Falle der Elektrizitätslehre zusammen mit der mengenartigen Größe Elektrizität (= Ladung) strömt. Mit der Information, dass diese Ladung ihrerseits von verschiedenen Ladungsträgern (Elektronen, Löchern, Ionen) „getragen“ wird, wollte man die Schüler vermutlich nicht verwirren. Andererseits könnte durch sie in anderen Teilbereichen die unangenehme Frage aufgeworfen werden, ob auch hier materielle Träger der mengenartigen Energieträger (Impuls, Drehimpuls, Entropie) existieren.

Der im KPK verfolgte Weg, bei den Schülern durch eine einfache Sprache und Analogien zu Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen eine propädeutische Substanzvorstellung von mengenartigen Größen zu bilden, birgt allerdings auch Gefahren. Das Wort „Strom“ drückt im normalen Sprachgebrauch immer auch eine Bewegung aus. Materielle strömende Stoffe bestehen aus individuellen Teilchen, die sich mit einer bestimmten „Geschwindigkeit“ bewegen. Im KPK wird das Wort „Strom“ jedoch für Ströme physikalischer Größen verwendet. Für das Modell einer strömenden Substanz gibt es nur die beiden Argumente, dass einerseits die Beschreibung das Verhalten der Körper, zwischen denen der Strom fließt, richtig wiedergibt, und dass andererseits das Gebiet zwischen den Körpern eine beobachtbare Veränderung erfährt. Weitere Übertragungen von der Modell- auf die Theorieebene, wie etwa die Frage nach der „Geschwindigkeit eines Impulsstroms“, sind nicht gerechtfertigt [FALK82].

Im Schülerband wird lediglich im Abschnitt „Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen“ in einem Satz erwähnt: „Man verwechselt leicht die Stärke eines Stroms mit seiner Geschwindigkeit“. Weitere Bemerkungen zu der m. E. naheliegenden Fehlvorstellung einer „Stromgeschwindigkeit“ mengenartiger Größen werden fast schon auffällig vermieden.

Das ist insofern verwunderlich, da bei der Entwicklung des KPK sicherlich mit entsprechenden Fehlkonzepten (vgl. z.B. [RHÖN86] und ref. darin) aus der Elektrizitätslehre gerechnet wurde, die aus Untersuchungen zu Schülervorstellungen z.B. über den elektrischen Stromkreis seit längerer Zeit bekannt sein dürften.

## 5.2 Klassische Mechanik nach dem Karlsruher Physikkurs

Besonders stark unterscheidet sich die Vorgehensweise des KPK von der traditionellen Schulphysik bei der Behandlung der klassischen Mechanik. Während gewöhnlich die Größen Energie und Impuls als abgeleitete Hilfsgrößen aus den Grundgrößen Ort, Geschwindigkeit, Masse und Kraft definiert werden, steht im KPK der Impuls von Anfang an im Mittelpunkt. Mit der m. E. erfreulichen Konsequenz, dass die Dynamik bereits im Unterricht der Sekundarstufe I einen größeren Raum einnimmt als üblicherweise.

In zwei vorgeschalteten Kapiteln (einem über Energie und Energieträger sowie einem weiteren über Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen) werden im Schülerband für die Sekundarstufe I [HERR93a] die später häufig gebrauchten Begriffe Energieträger, Gleichgewicht, Stromstärke, Antrieb, Widerstand, Knoten- und Maschenregel sowie die Strukturen des KPK an anschaulichen Beispielen eingeführt. Als Energieträger dienen im Anfängerunterricht nicht die späteren abstrakten physikalische Größen sondern reale Substanzen wie z.B. Wasser, Benzin und Luft.

Wie aus *Tabelle 5.1.1* ersichtlich, ist die Mechanik im Konzept des KPK der Teil der Physik, der sich (neben der Energie) mit den mengenartigen Größen Impuls und Drehimpuls bzw. deren Strömen beschäftigt. Beispielsweise soll für die Größe Impuls bei den Schülern zunächst eine eigenständige, von der erst viel später behandelten Beziehung  $p = m \cdot v$  unabhängige Anschauung gebildet werden. Als umgangssprachliche Synonyme für die Größe, die später den Namen Impuls erhält, werden zunächst die Worte „Schwung“ und „Wucht“ (die ein bewegter Körper enthält) verwendet. Ferner bekommt die Größe, ihrer Bedeutung angemessen, die eigene (SI-kompatible) Einheit Huygens (Hy):

1 Huygens = 1 Newton · Sekunde.

Unabhängig von dem, was in der Sekundarstufe 1 tatsächlich im Unterricht machbar ist, bietet die Darstellung der Mechanik des KPK zunächst einige Vorteile.

„Diese Darstellung ist zum traditionellen Aufbau insofern äquivalent, als es keine Fragestellung gibt, die in dieser neuen Darstellung gelöst, in der alten aber nicht gelöst werden kann und umgekehrt; denn in der mathematischen Fassung unterscheiden sich beide Darstellungen nicht. Sie unterscheiden sich dagegen in der verbalen Beschreibung und in den der Beschreibung zugrundeliegenden Bildern, ohne die ja keine Beschreibung auskommt. Die Vorteile der neuen Darstellung sind typisch didaktischer Art:

- Die Beschreibung ist eine Formulierung im Sinn einer Nahwirkungstheorie. Felder erscheinen nicht als Hilfsmittel, um Kraftwirkungen auf Körper zu beschreiben, sondern als physikalische Systeme, die genauso real sind wie die Körper selbst.

- Da die Mengenartigkeit des Impulses (und auch der Energie) von Anfang an offensichtlich wird, wird die Beschreibung physikalischer Vorgänge einfacher, bildhafter und dadurch durchsichtiger als in der traditionellen Mechanik. Mechanische Vorgänge werden daher in weit größerem Maße als gewohnt mit dem Vokabular der normalen Umgangssprache beschreibbar. Mit den Wörtern Impuls und Impulsstrom (= Kraft) geht man genauso um wie etwa mit den Wörtern Wasser und Wasserstrom. Insbesondere kommen Bezeichnungen, die ins Vokabular einer Fernwirkungstheorie gehören, nicht vor (wie z.B. Kraft, Arbeit, Leistung, Austausch, Wechselwirkung). Die Transparenz der Beschreibung führt dazu, dass der Lernende sehr früh Fragen stellt, die bei traditioneller Sprechweise nicht nahe liegen. So liegt die Frage nach der Impulsstromverteilung etwa zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern auf der Hand, wogegen die Frage in der Sprache der traditionellen Mechanik formuliert (als Frage nach dem „Spannungszustand des Raums“ zwischen den Körpern) sich kaum von selbst stellt.
- Die hier vorgeschlagene Mechanik ist in ihrer formalen Struktur anderen Teilgebieten der Physik sehr ähnlich, z.B. der Elektrizitätslehre, der Thermodynamik und der Chemie. Diese Tatsache macht die Physik nicht nur ästhetischer, sie macht das Erlernen der Physik auch ökonomischer.“ [FALK82]

Dieser Aufbau der Mechanik vermeidet die meisten Schwierigkeiten, die üblicherweise durch den Kraftbegriff verursacht werden. Aufgrund der anschaulichen Sprache des KPK bekommen z.B. die Newtonschen Axiome im Impulsstrombild eine äußerst einfache Form (vgl. *Tabelle 5.2.1* aus [HERR95]).

| .                    | Traditionelle Formulierung  | Formulierung im Impulsstrombild   |
|----------------------|---|---|
| 1. Newtonsches Axiom | Ein Körper, auf den keine Kräfte wirken, bleibt in Ruhe, oder er bewegt sich geradlinig gleichförmig.   | Ein Körper, in den kein Impulsstrom hineinfließt, und aus dem kein Impulsstrom herausfließt, ändert seinen Impuls nicht.  |
| 2. Newtonsches Axiom | Die zeitliche Änderung $d\mathbf{p}/dt$ des Impulses eines Körpers ist gleich der auf den Körper wirkenden Kraft $\mathbf{F}$ : $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$ | Die zeitliche Änderung $d\mathbf{p}/dt$ des Impulses eines Körpers ist gleich der Stärke $\mathbf{F}$ des Impulsstroms, der in den Körper fließt: $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$ |
| 3. Newtonsches Axiom | Übt ein Körper A auf einen Körper B die Kraft $\mathbf{F}$ aus, so übt B auf A die gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft $-\mathbf{F}$ aus.     | Fließt ein Impulsstrom aus einem Körper A in einen Körper B, so ist die Stromstärke beim Verlassen von A dieselbe wie beim Eintritt in B.                                       |

**Tabelle 5.2.1**

Übersetzung der Newtonschen Axiome in die Impulsstromsprache (aus [HERR95]).

Wird die Erhaltungseigenschaft des Impulses (wie die Ladungserhaltung in der Elektrizitätslehre) im Unterricht von vornherein als selbstverständlich vorausgesetzt, brauchen die Newtonschen Axiome gar nicht behandelt zu werden. Dass für die Größe Impulsstromstärke außerhalb des KPK der Name „Kraft“ gebräuchlich ist, wird im Schülerskript des KPK lediglich kurz erwähnt [HERR93a, HERR95].

Dafür treten allerdings andere, im traditionellen Unterricht wenig beachtete Fragestellungen auf. Im traditionellen Unterricht dienen Stoßprozesse (wenn überhaupt) zur Erklärung der Impulserhaltung. Dabei wird nicht der Übertragungsvorgang an sich, sondern die Zustände vor und nach dem Stoß betrachtet. Eine Beschreibung im Impulsstrombild lenkt jedoch den Blick gerade auf den während des Stoßes fließenden Impulsstrom. Um den „Übertragungsvorgang“ zeitlich besser aufzulösen, kann man eine elastische Feder zwischen die stoßenden Körper einbauen. An ihrer Verformung erkennt man, dass während des Stoßes ein Impulsstrom fließt. Da „Impulsstromstärke“ und „Kraft“ die gleiche physikalische Größe beschreiben, sind natürlich Messgeräte für Impulsstromstärken nichts anderes als Federkraftmesser. Durch Körper, die unter Zug- oder Druckspannung stehen, fließt also immer ein Impulsstrom. Die Erhaltungseigenschaft des Impulses wird im Schülerband als selbstverständlich angenommen. Damit spielen die „Leitungen“ für die Impulsströme die gleiche zentrale Rolle, wie Leitungen beim elektrischen Stromkreis und es ergibt sich zwangsläufig die Frage auf welchen geschlossenen Wegen der Impuls entlang strömt.

Bereits bei dem eindimensionalen analogen Problem des elektrischen Stromkreises müssen dabei drei Vorzeichenfragen geklärt werden. Die Stromrichtung an irgendeiner Stelle eines einfachen elektrischen Stromkreises ergibt sich aus der Festlegung, dass der Strom vom höheren (+) zu niedrigeren Potential (-) fließt. Diese Festlegung ist äußerst sinnvoll, da sie unserer Anschauung entspricht:

„Ein positiv geladener Gegenstand A ist über einen Widerstand mit einem negativ geladenen Gegenstand B verbunden. Zwischen A und B fließt nun ein Strom, so dass die Ladung von A ab- und die von B zunimmt. Aufgrund der „Konvention“ über die Stromrichtung sagen wir, dass der elektrische Strom von A nach B fließt. Aus dem Körper, dessen Ladung *abnimmt* fließt er *heraus*, in den Körper dessen Ladung *zunimmt*, fließt er *hinein*.“ (Hervorhebungen im Original) [FALK82]

Zu Unterscheiden von der Stromrichtung ist das Vorzeichen der Stromstärke  $I$ . Während man unter der Stromrichtung die Richtung des Vektorfeldes der Stromdichte  $\mathbf{j}$  versteht, bezieht sich das Vorzeichen der Stromstärke  $I$  stets auf eine orientierte Fläche  $d\mathbf{A}$ , ist also für eine nichtorientierte Fläche (z.B. Drahtquerschnitt) nicht eindeutig:

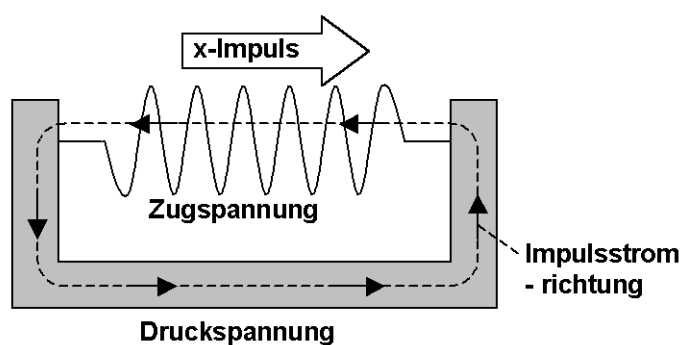
$$I = \int_s \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A}$$

Im elektrischen Fall wird im Allgemeinen wenig Aufhebens darüber gemacht, da man sich häufig nur für den Betrag der Stromstärke interessiert. Bei (eindimensionalen) Problemen, in denen es um Kräfte geht, würde (in traditioneller Sprechweise) die Wahl der orientierten Fläche darüber entscheiden, welcher der beiden Kraftpfeile, die eine Wechselwirkung beschreiben, gemeint ist.

Drittes festzulegendes Vorzeichen ist im elektrischen Fall das Vorzeichen der elektrischen Ladung selbst (Atomkern positiv). Daraus wird die oben dargestellte „Konvention“ über die Stromrichtung möglich.

Um diese Strukturen auf die Beschreibung im Impulsstrommodell übertragen zu können, müssen auch hier die Richtung des Stroms und die Richtung dessen was strömt festgelegt werden. Dazu wurde im KPK eine willkürliche Vorzeichenfestlegung für den Impuls getroffen. Ein Körper, der sich in Richtung der (nach rechts gerichteten) positiven x-Achse bewegt, besitzt danach positiven x-Impuls. Diese Auszeichnung einer Raumrichtung ergibt jedoch eine asymmetrische Beschreibung eines von Natur aus symmetrischen Systems (vgl. *Abbildung 5.2.1*).

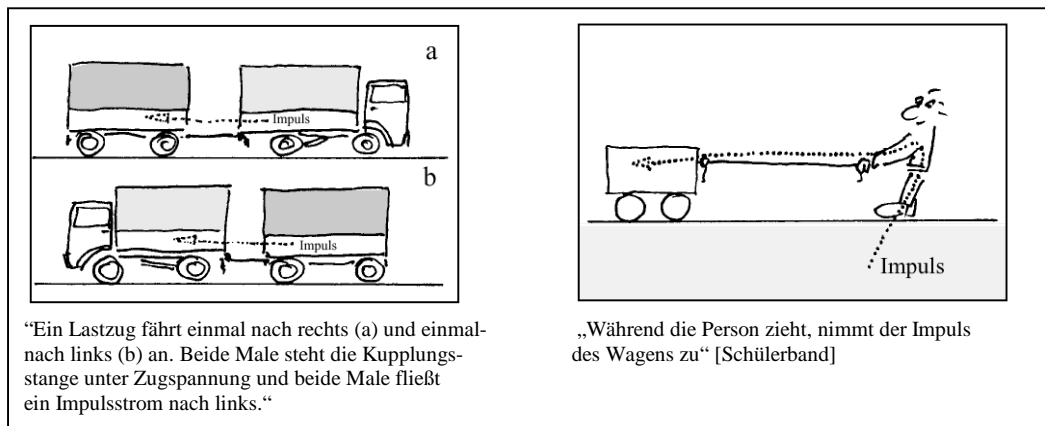
„Durch einen in i-Richtung orientierten Impulsleiter fließt i-Impuls in die positive i-Richtung, wenn der Leiter unter Druckspannung steht und in die negative i-Richtung, wenn der Leiter unter Zugspannung steht. (i steht für x, y oder z)“ [FALK82]



**Abbildung 5.2.1**

*Vorzeichenfestlegung des Impulses: Nach rechts gerichteter (x-Impuls) fließt in der unter Zugspannung stehenden Feder (oben) nach links (rückwärts). In dem unter Druckspannung stehendem Stab (unten) nach rechts (vorwärts).*

Im Schülerband wird diese Konvention verwendet (vgl. *Abbildung 5.2.2*, links) und ein großer Teil der Mechanik zunächst eindimensional behandelt. In den dargestellten Beispielen gibt es häufig Stellen, an denen die Richtung des strömenden Impulses nicht mit der Richtung des Impulsleiters übereinstimmt (vgl. *Abbildung 5.2.2*, rechts).



### Abbildung 5.2.2

Beispiele zur Konvention der Vorzeichenfestlegung des Impulses im Schülerband (aus [HERR93a]).

Eine Unterscheidung der Impulsströme bei Zug- und Druckspannung wäre auch möglich, wenn man die Festlegung „positiver Impuls = Impuls nach rechts“ nicht getroffen hätte [TREI97]:

„Wenn ein Knotenpunkt von links dauernd nach links gerichtete Impulsänderungen und von rechts eben so starke nach rechts gerichtete bekommt (wenn also von beiden Seiten an ihm gezogen wird), so kann man das auch als eine von links nach rechts durch den Knoten wandernde und nach links gerichtete Impulsänderung auffassen (oder ebenso gut stattdessen als eine nach links wandernde, aber nach rechts gerichtete, auf jeden Fall also eine „rückwärts reisende“)

Gummibänder, gespannte Federn, aber ebenso auch das Schwerfeld treten dabei als Leiter für Impulse (genauer Impulsänderungen) auf, Luftkissen und Schmiermittel dagegen als Isolatoren. Wir können hinsichtlich der Orientierung sehr klar zwei Fälle unterscheiden, ...“

| <b>Anziehung</b>                                  | <b>Abstoßung</b>                                 |
|---|--|
| <i>Impuls(-änderung) wandert <b>rückwärts</b></i> | <i>Impuls(-änderung) wandert <b>vorwärts</b></i> |
| <i>verlängerte Feder</i>                          | <i>verkürzte Feder</i>                           |
| <i>el. Ladungen ungleicher Vorzeichen</i>         | <i>el. Ladungen gleicher Vorzeichen</i>          |
| <i>Gravitation</i>                                |  |

Tabelle aus [TREI97]

Die im Vergleich zur Beschreibung mit dem Kraftbegriff zunächst übersichtlichere Darstellung des KPK wird an einer weiteren Stelle problematisch, denn im Gegensatz zur Elektrizitätslehre sind Impuls und Impulsstromstärke Vektoren, die Stromdichte ist ein Tensor 2. Stufe (Spannungstensor). Man kann die sich daraus ergebenden Schwierigkeiten etwas mildern, wenn man ein einmal gewähltes Koordinatensystem beibehält und das Strömen der

vektoriellen Größe  $\mathbf{p}$  als ein Strömen der drei voneinander unabhängigen skalaren Größen  $p_x$ ,  $p_y$  und  $p_z$  beschreibt. Wie die Autoren des KPK im Lehrerband zugeben, ist diese Art der Darstellung für den Unterricht aber ungeeignet:

„Die Behandlung eines Problems wird dann recht verwickelt, wenn eine Impulsleitung, ein Seil zum Beispiel, schräg zu den Koordinatenachsen verläuft. Es fließen dann nämlich in der Leitung gleichzeitig mehrere Impulsströme. So fließt in einem Seil, das in der x-y-Ebene liegt und weder zur x- noch zur y-Achse parallel ist, gleichzeitig ein x- und ein y-Impulsstrom. Diese Ströme können sogar in entgegengesetzter Richtung fließen. Wegen dieser Komplikationen haben wir uns für die zweite Möglichkeit des Vorgehens entschieden. Der Impuls wird als Pfeil dargestellt. Jede Richtung kennzeichnet eine Impulssorte. Es gibt also unendlich viele verschiedene Impulssorten. Im Text kennzeichnen wir die Impulssorten durch Angabe des Winkels des Impulsvektorpfeils gegen die positive x-Achsenrichtung, und wir sagen etwa, in einem Seil fließe 45°-Impuls.“ [HERR95]

Um Wiederholungen zu vermeiden, wird auf weitere, von der traditionellen Vorgehensweise abweichende Einzelheiten des KPK, wie z.B. der Rolle des Impulses als Energieträger, bei der Diskussion der Ergebnisse der empirischen Untersuchung im nächsten Abschnitt eingegangen.

### 5.3 Ergebnisse einer Vergleichsbefragung

Wenn Worte der Fachsprache das Lösungsverhalten bei physikalischen Problemstellungen beeinflussen, sollten sich Unterschiede bei der Befragung von VPN zeigen, die verschiedene Fachsprachen für gleiche Sachverhalte gelernt haben. Für Worte, die aus der Alltagssprache stammen, könnten sich folglich bereits Unterschiede ergeben, die unabhängig von der Komplexität der zugrundeliegenden Wortbedeutung sind. Bei einem Vergleich zwischen Schülern, die nach dem KPK unterrichtet wurden, mit traditionell unterrichteten Schülern, könnte sich das Fehlen sprachlich bedingter „Misskonzepte“, die vom Wort „Kraft“ verursacht werden, bei der Karlsruher Gruppe bemerkbar machen.

Die Verschiedensprachigkeit beider Stichproben gilt, was die Fachsprache angeht, nicht streng, da die Karlsruher Gruppe in der Mittelstufe traditionellen Physikunterricht hatte, also bereits mit dem physikalischen Kraftbegriff in Berührung kam. Andererseits können durch den Fragebogen auch bei dieser Gruppe Assoziationen zum Alltagsbegriff „Kraft“ geweckt werden. Speziell bei Fragestellungen, die schwierig im Impulsstrommodell zu beschreiben sind, ist anzunehmen, dass die Karlsruher Schüler, genauso wie andere Schüler auch, auf Erklärungsmodelle aus Alltagstheorien zurückgreifen. In diesen dürfte das Impulsstrombild kaum eine Rolle spielen.

#### 5.3.1 Zusammensetzung der Stichproben

In der Karlsruher Gruppe wurden 52 Oberstufenschüler/Innen aus dem Grund- und Leistungskurs Physik (GK und LK) in Klasse 13 befragt, die in Klasse 11 nach dem Karlsruher Physikkurs unterrichtet wurden. Der Stoffumfang in Klasse 11 deckt die gesamte Mechanik auf Oberstufenniveau (Kinematik, Dynamik, Statik) in ihrer Darstellung nach dem KPK ab. In der Oberstufe wurde bei den befragten Schülern darüber hinaus die Elektrizitätslehre nach dem KPK unterrichtet [HERR97a, HERR97b]. Da der Mechanikkurs aus Klasse 11 fast komplett in den GK und LK Physik übernommen wurde, entsprechen die befragten Schüler fast dem kompletten Jahrgang.

Als Vergleichsgruppe (V-Gruppe) dienen 63 Oberstufenschüler (Befragungen in Klassen 12 und 13), die in Klasse 11 traditionellen Mechanikunterricht hatten. Um Scheinabhängigkeiten aufgrund der Merkmale „Geschlecht“ bzw. „GK-/LK Physik“ zu vermeiden, sind die Anteile dieser beiden Merkmale in beiden Teilstichproben praktisch gleich (vgl. *Tabelle 5.3.1* oben). Dennoch sind weibliche VPN im GK der Karlsruher Gruppe überrepräsentiert, im LK der Vergleichsgruppe dagegen leicht unterrepräsentiert (vgl. *Tabelle 5.3.1* unten). Das wird bei der Auswertung von Frage 1 berücksichtigt, da aus der Gesamtuntersuchung bekannt ist, dass bei der Beantwortung dieser Frage neben der physikalischen Vorbildung auch das Merkmal „Geschlecht“ eine Rolle spielt.



| Geschlecht | KPK<br>(N = 52 VPN) | V-Gruppe<br>(N = 63 VPN) |
|------------|---------------------|--------------------------|
| <b>m</b>   | <b>61,5 %</b>       | <b>61,9 %</b>            |
| <b>w</b>   | <b>38,5 %</b>       | <b>38,1 %</b>            |

| Leistungs-<br>/Grundkurs | KPK<br>(N = 52 VPN) | V-Gruppe<br>(N = 63 VPN) |
|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| <b>GK</b>                | <b>25,0 %</b>       | <b>25,4 %</b>            |
| <b>LK</b>                | <b>75,0 %</b>       | <b>74,6 %</b>            |

| <b>Stichprobe KPK</b><br>(Karlsruher Physikkurs) |               |               |               |
|--|---------------|---------------|---------------|
|  | <b>32 VPN</b> | <b>20 VPN</b> | <b>52 VPN</b> |
| <b>GK</b>  | <b>2 VPN</b>  | <b>11 VPN</b> | <b>13 VPN</b> |
| <b>LK</b>  | <b>30 VPN</b> | <b>9 VPN</b>  | <b>39 VPN</b> |
|  | <b>m</b>      | <b>w</b>      |               |

| <b>Stichprobe V-Gruppe</b><br>(traditioneller Mechanikunterricht) |               |               |               |
|---|---------------|---------------|---------------|
|   | <b>39 VPN</b> | <b>24 VPN</b> | <b>63 VPN</b> |
| <b>GK</b>   | <b>5 VPN</b>  | <b>11 VPN</b> | <b>16 VPN</b> |
| <b>LK</b>   | <b>34 VPN</b> | <b>13 VPN</b> | <b>47 VPN</b> |
|   | <b>m</b>      | <b>w</b>      |               |

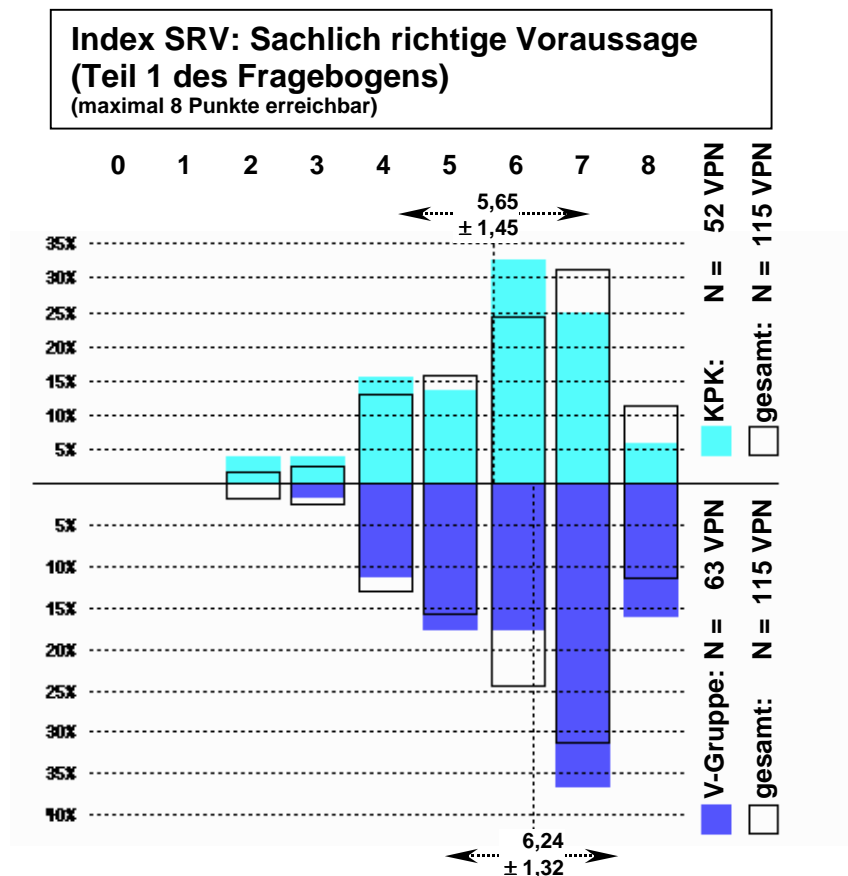
**Table 5.3.1**

*Zusammensetzung der Stichproben für die Vergleichsbefragung.*

Im folgenden werden die Ergebnisse der Vergleichsbefragung vorgestellt. Da der gleiche Fragebogen verwendet wurde, entspricht die Auswertung hinsichtlich Reihenfolge und Darstellung prinzipiell der von Kapitel 4. Aufgrund der kleineren Stichprobenumfänge wird jedoch auf die Untersuchung von Assoziationen zwischen einzelnen Fragen innerhalb einer Stichprobe verzichtet.

### 5.3.2 Durch Indexbildung zusammengefasste Fragenkomplexe

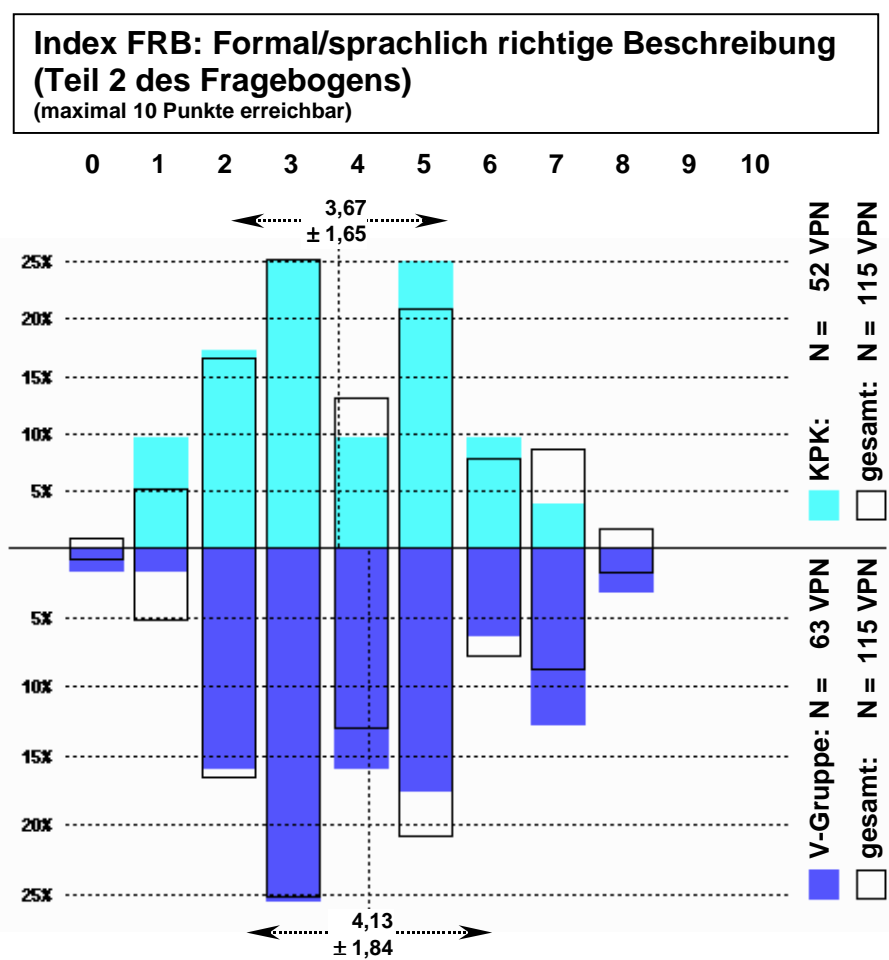
Die beiden Merkmale „sachlich richtige Voraussage“ und „formal/sprachlich richtige Beschreibung“ werden (wie in Abschnitt 4.4.1) durch die beiden Indizes SRV und FRB erfasst. Die Voraussagen in Teil 1 des Fragebogens erfolgten ohne Verwendung der Fachsprache. Falls sich der KPK vom traditionellen Mechanikunterricht im Wesentlichen nur durch die Fachsprache unterscheidet, sollte der Index SRV demzufolge kaum von den unterschiedlichen Fachsprachen der Teilstichproben abhängen. Wie im letzten Abschnitt diskutiert, bestehen zwischen beiden Konzepten jedoch drastische inhaltliche Unterschiede. Es ist daher überraschend, wie wenig sich diese Unterschiede in der Voraussagekompetenz der VPN widerspiegeln. Wie *Abbildung 5.3.1* zeigt, erreichen beide Teilstichproben beim SRV-Index ähnliche Ergebnisse. Die im Mittel etwas (0,5 Punkte) niedrigere Punktzahl der Karlsruher Schüler beruht zu einem Drittel auf falschen Voraussagen zu Frage 3 (vgl. Abschnitt 5.3.3.2 Statik weiter unten).



**Abbildung 5.3.1**

*Vergleich der von den Karlsruher Schülern (KPK) im SRV-Index erreichten Punktzahl mit der Punktzahl traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe).*

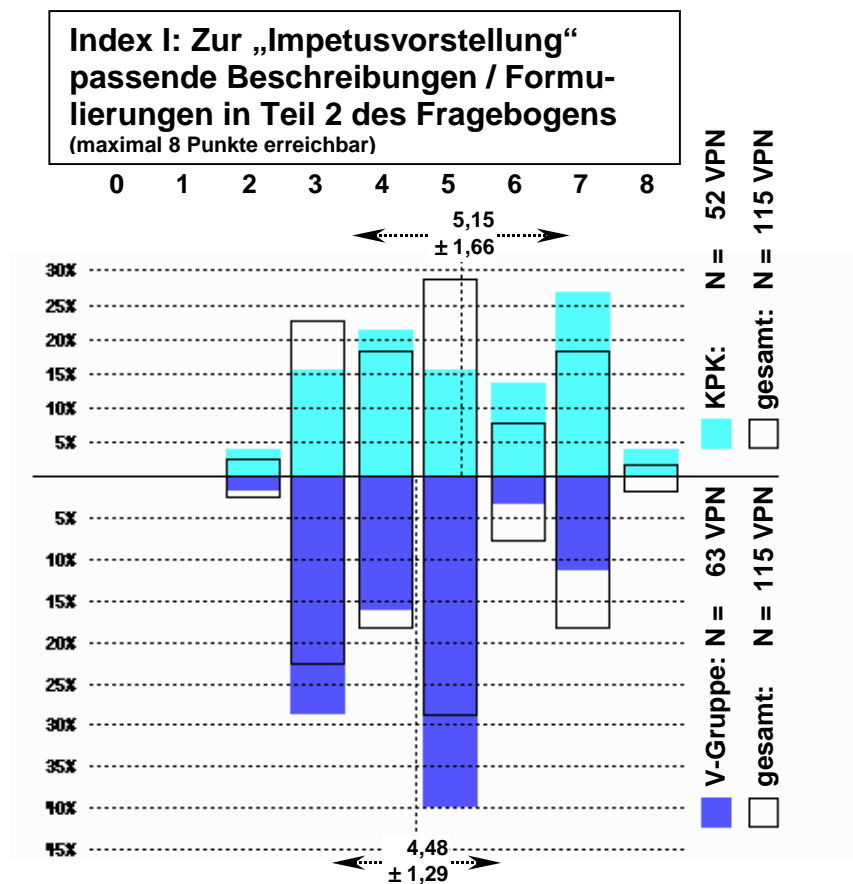
Wesentlich größere Unterschiede wurden dagegen bei den Antworten zum formalen- bzw. sprachlichen Teil des Fragebogens erwartet. Im KPK spielt das Wort „Kraft“ keine Rolle und wird lediglich einmal als weiterer Name für die Größe Impulsstromstärke erwähnt. So ist es erstaunlich, dass auch beim Index FRB kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Teilstichproben, was die erreichte mittlere Punktzahl angeht, auftritt (Abbildung 5.3.2). Genau wie bei der Gesamterhebung liegt die mittlere Punktzahl im formalen- bzw. sprachlichen Teil für beide Teilstichproben deutlich unter der des nonverbalen Teils (bezogen auf die jew. zu erreichende Gesamtpunktzahl). Das spricht in gewissem Sinne für die Antworten der Karlsruher Schüler, da diesen der Umgang mit dem Wort „Kraft“ weniger vertraut ist. Betrachtet man die Punktzahlen der Karlsruher Gruppe, fällt auf, dass relativ wenige VPN mittlere Punktzahlen erreichen. Dieser Effekt tritt auch auf, wenn nur die (N = 39) Schüler des Leistungskurses betrachtet werden.



**Abbildung 5.3.2**

Vergleich der von den Karlsruher Schülern (KPK) im FRB-Index erreichten Punktzahl mit der Punktzahl traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe).

Er könnte durch „zweisprachige“ VPN verursacht werden, denen die Übersetzung der „Karlsruher Sprache“ in die der traditionellen Mechanik gelingt. Umgekehrt würden Schüler, die diesen Transfer nicht leisten, entsprechend schlechter abschneiden. Die sich daraus ergebende Annahme einer zweigipfligen Verteilung ist aufgrund der kleinen Stichproben sowie der geringen Anzahl von Items jedoch ziemlich spekulativ.

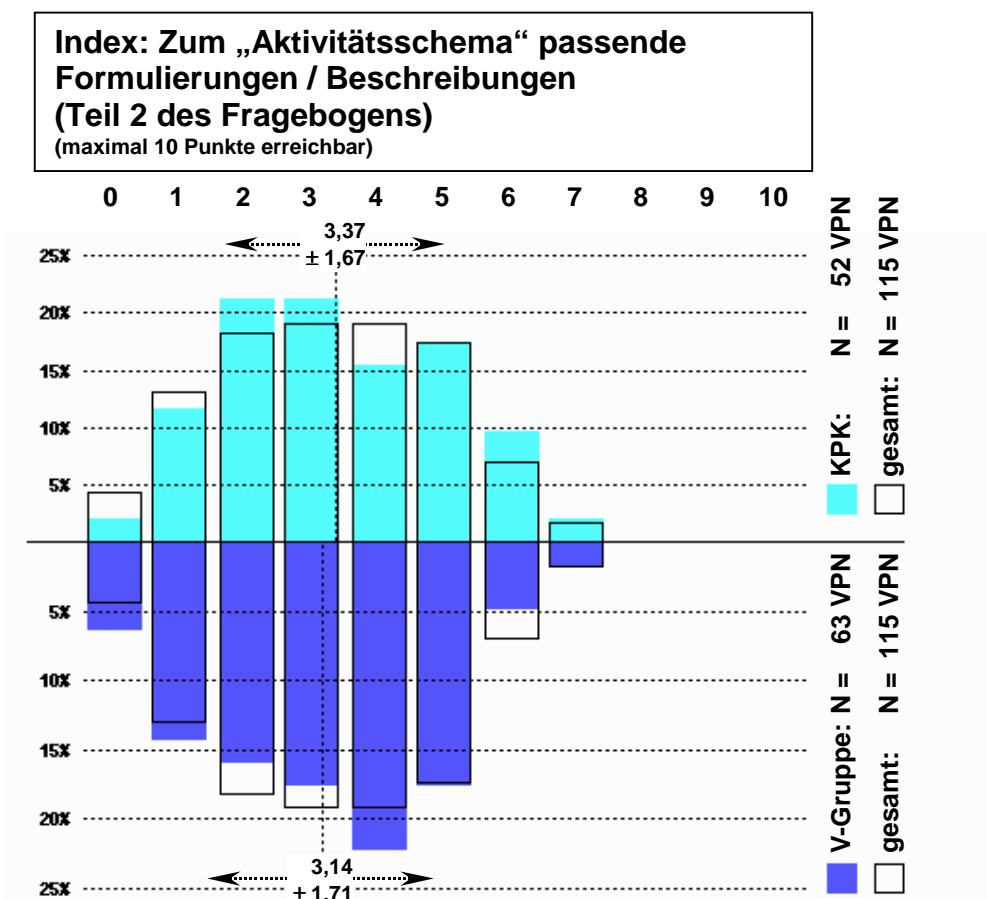


**Abbildung 5.3.3**

Vergleich der von den Karlsruher Schülern (KPK) im I-Index erreichten Punktzahl mit der Punktzahl traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe).

Einen weiteren Hinweis auf „Übersetzungsschwierigkeiten“ eines Teils der Karlsruher Gruppe liefern jedoch die im I-Index zusammengefassten, zur „Impetusvorstellung“ passenden Beschreibungen (zur Definition des I-Index vgl. Abschnitt 4.4.1). Auch hier unterscheiden sich zwar die Mittelwerte nicht signifikant, aber ein Teil der Karlsruher Gruppe erreicht recht hohe Punktzahlen (vgl. *Abbildung 5.3.3*). Dahinter könnten sich u. a. Schwierigkeiten bei der begrifflichen Unterscheidung von Impuls, Impulsstrom und Impulsstromstärke (= Kraft) verbergen. Auf Einzelheiten wird bei der Diskussion der entsprechenden Fragen in den folgenden Abschnitten eingegangen.

In ihren zum „Aktivitätsschema“ (zur Definition des A-Index vgl. Abschnitt 4.4.1) passenden Beschreibungen bzw. Formulierungen unterscheiden sich beide Teilstichproben hinsichtlich Mittelwert und Verteilungsform praktisch nicht (*Abbildung 5.3.4*). Da der A-Index im Wesentlichen asymmetrische Kraftkonzepte zusammenfasst, spricht diese Ergebnis eher für die Kenntnisse der Karlsruher Schüler, denn im KPK werden symmetrische Situationen durch eine asymmetrische Beschreibung (willkürliche Wahl des Vorzeichens des strömenden Impulses) dargestellt.



**Abbildung 5.3.4**

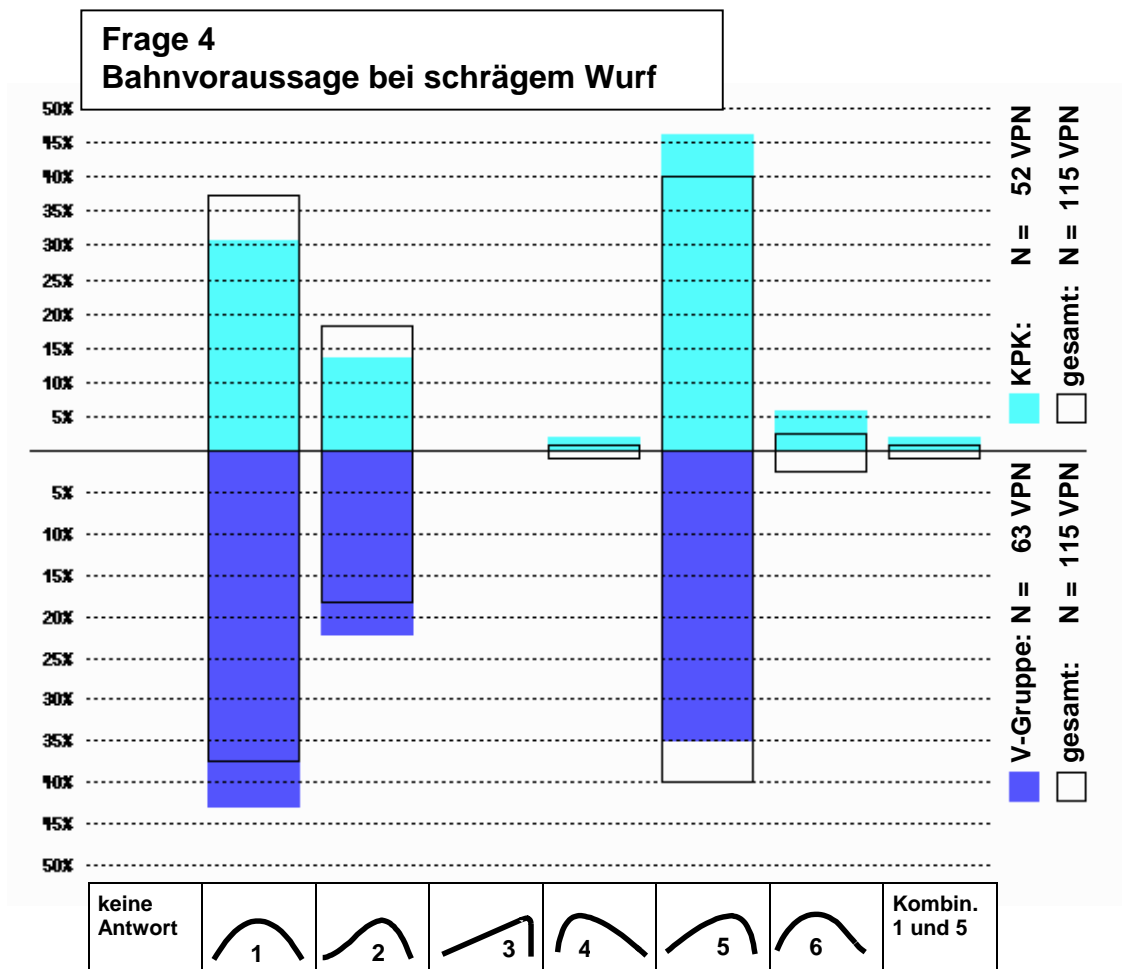
Vergleich der von den Karlsruher Schülern (KPK) im A-Index erreichten Punktzahl mit der Punktzahl traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe).

### 5.3.3 Einzelergebnisse

#### 5.3.3.1 Dynamik

A Situationen in denen nur ein Körper betrachtet wird.

Bei der Diskussion der Ergebnisse zur Situation „schräger Wurf“ (Abschnitt 4.4.2.1.1) wurde u. a. gezeigt, dass physikalisch vorgebildete VPN bei ihren Voraussagen eher von Reibung absahen. Im Gegensatz zum traditionellen Mechanikunterricht werden Reibungsprozesse im KPK bereits vor Einführung der Geschwindigkeit thematisiert. Mit dem Begriff „Reibung“ werden im KPK alle Vorgänge beschrieben, bei denen Energie dissipiert (also Entropie erzeugt) wird.



**Abbildung 5.3.5**

*Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 4.*

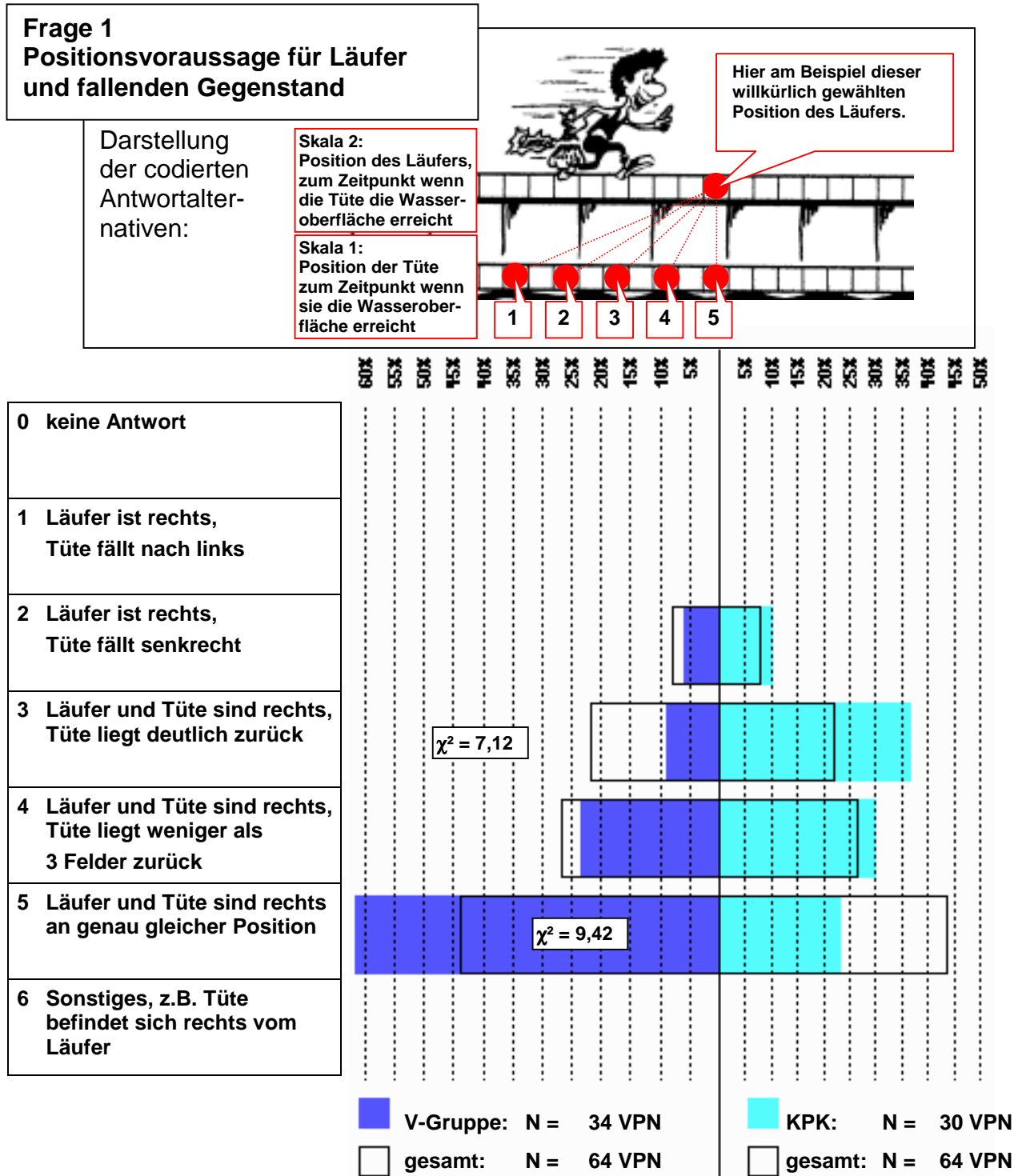


Abbildung 5.3.6

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 1. Aufgrund (bei dieser Frage) zu erwartender geschlechtsspezifischer Unterschiede, wurden nur männliche VP (N = 64) mit Leistungskurs Physik berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang ist übrigens die sogenannte Haftreibung ein weiteres Beispiel für eine unlogische Wortwahl der Fachsprache, denn das Haften zweier Oberflächen aneinander geschieht ohne Energieumsatz und fällt damit nicht unter obige Kategorie [TREI97, HERR95]. Leider legen die im Schülerband des KPK nahe beieinander stehenden Formulierungen „Feste Stoffe leiten den Impuls“ [HERR93a, S32] und „Reiben zwei Gegenstände aneinander, so fließt Impuls vom einen zum anderen: je größer die Reibung, desto mehr“ [HERR93a, S33] diesen Schluss nicht unbedingt nahe. Der beabsichtigte Reibungsbegriff wird jedoch an anderer Stelle durch eine Reihe von einprägsamen Beispielen gefestigt. Bei der späteren Behandlung des Schwerfeldes wird die Luftreibung ausführlich thematisiert. Um Formeln zu vermeiden, wird den Schülern für quantitative Betrachtungen an einem bestimmten Körper die „Stärke des Impulsstroms, der in die Luft abfließt“ (Newtonsche Reibungskraft) als Funktion der Geschwindigkeit jeweils in einem Diagramm vorgegeben.

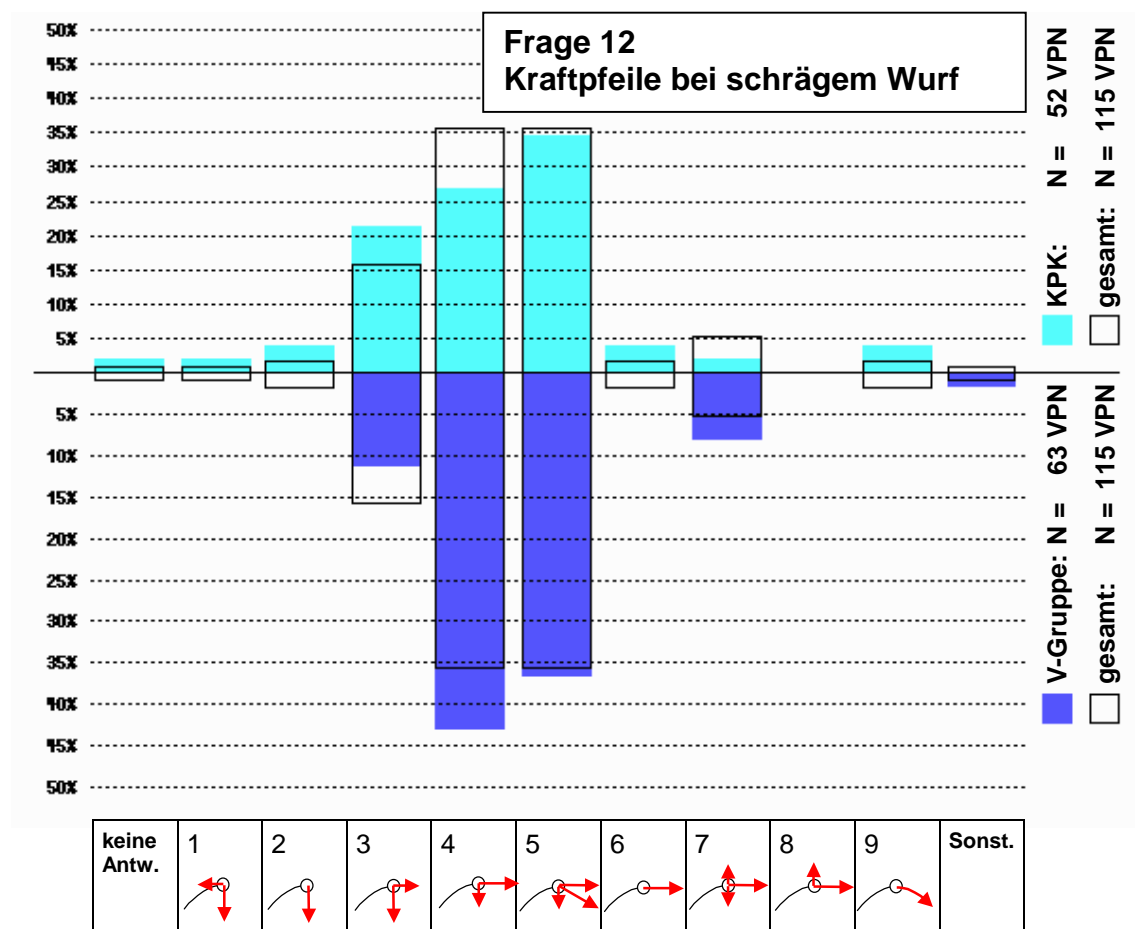
Die Ergebnisse zu den Fragen 4 (*Abbildung 5.3.5*) und insbesondere Frage 1 (*Abbildung 5.3.6*) lassen vermuten, dass die Karlsruher Schüler häufiger den Einfluss von Reibung in ihre Bahnvorhersagen einbeziehen. Bei Frage 1 wurden die in Abschnitt 4.4.2.1.1 gefundenen, geschlechtsspezifischen Unterschiede eliminiert, indem in *Abbildung 5.3.6* nur eine Teilstichprobe (männliche VPN im LK-Physik, N = 64 VPN) betrachtet wurde.

Auf die Frage nach Kraftpfeilen beim schrägen Wurf ergeben sich, was formal korrekte Beschreibungen angeht, für die hier betrachteten Stichproben ähnliche Ergebnisse wie in der Haupterhebung. Lediglich 3 VPN (alle aus der Karlsruher Gruppe) wählen formal korrekte Kraftpfeile. *Abbildung 5.3.7* zeigt ferner, dass bei den formal falschen Lösungen von der Karlsruher Gruppe häufiger solche mit dem kürzeren Pfeil in Bewegungsrichtung (Nr. 3) gewählt werden. Das könnte damit zusammenhängen, dass im KPK Felder als impulsleitende Verbindungen und Energiespeicher eine sehr gegenständliche Bedeutung besitzen und deshalb in entsprechenden Situationen stärker beachtet werden.

Das Schwerfeld kommt im KPK an verschiedenen Stellen vor. Die Beispiele beschränken sich, wie bei der traditionellen Vorgehensweise auch, zunächst auf senkrechte Bewegungen. Sicherlich um hier mit eindimensionalen Impulsströmen (Impulsstrom nach unten: Druckspannung, Impulsstrom nach oben: Zugspannung) auszukommen. Erst gegen Ende des übernächsten Kapitels im Schülerband („Der Impuls als Vektor“) wird eine Beschreibung des schrägen Wurfs möglich.

Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt aber im KPK nicht auf dem genauen Weg des Impulsstroms „Diese (Die Impulsstromdichteverteilung in Feldern, Anm. d. Verf.) ist recht kompliziert. Wir diskutieren sie im Unterricht genauso wenig, wie wir den Weg des Impulses weiterverfolgen, wenn er einmal in die Erde gelangt ist. Es ist wichtig, dass die Schüler zu der Überzeugung gelangen, dass der Impuls irgendwo lang fließt. Der genaue Weg ist aber nicht sehr interessant.“ [HERR95]





**Abbildung 5.3.7**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 12.

Das Beispiel „Der nach oben geworfene Stein“ aus dem Abschnitt „Die verwickelten Wege von Energie und Impuls“ des Schülerbandes [HERR93a] soll die Form verdeutlichen, in der die Wege von Energie und Impuls im KPK behandelt werden:

#### „Die Energie

Beim Abwerfen geht Energie aus den Muskeln der werfenden Person in den Stein. Während des Aufsteigens fließt die Energie ins Schwerfeld. Im oberen Umkehrpunkt ist sie ganz aus dem Stein heraus, und beim Herunterfallen fließt sie aus dem Feld zurück in den Stein. Beim Auftreffen auf der Erde wird Wärme erzeugt. Die Energie verteilt sich mit der Wärme in der Umgebung: Im Stein, in der Erde und in der Luft.“

#### „Der Impuls

Beim Abwerfen „pumpt“ die Person negativen Impuls aus der Erde in den Stein. Während des Aufsteigens fließt aus der Erde durch das Schwerfeld (positiver) Impuls in den Stein, der

negative Impuls des Steins nimmt dadurch ab. Im Umkehrpunkt ist der ganze negative Impuls des Steins kompensiert. Der Zufluss von positivem Impuls hört hier aber nicht auf. Daher setzt sich der Stein in die positive Richtung, d. h. nach unten, in Bewegung, sein (positiver) Impuls nimmt beim Fallen zu. Beim Aufschlag gibt er ihn wieder an die Erde ab.“ [HERR93a]

Interessant ist, dass eine im Prinzip der Frage 12 entsprechende Situation im Schülerband des KPK als Beispiel für die Addition von (Impuls-)Vektoren vorkommt. Wie die *Abbildung 5.3.8* zeigt, werden darin lediglich sprachliche Unterschiede zwischen Impulsänderung („bekommt Impuls dazu“) und Impuls gemacht. Ein Bild, in dem die verschiedenen physikalischen Größen „Impulsstromstärke“ und „Impuls“ symbolisch unterschieden werden, kommt an dieser Stelle nicht vor. Das könnte eine der Ursachen dafür sein, dass den Karlsruher Schülern diese begriffliche Trennung schwer fällt.

#### Beispiel

Ein 0,5 kg schwerer Stein wird in waagrechtlicher Richtung weggeworfen, *Abb. 6.15*. Er hat sofort nach dem Wegwerfen 3 Hy  $0^\circ$ -Impuls. Auf Grund seiner Schwere bekommt er nun von der Erde ständig neuen Impuls, und zwar  $270^\circ$ -Impuls. Wieviel, und was für Impuls hat er nach 2 Sekunden? Die Stärke des Impulsstroms von der Erde berechnen wir zu

$F = m \cdot g = 0,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 5 \text{ N}$ . Der Stein bekommt also von der Erde pro Sekunde 5 Hy. Der Impuls, der in 2 Sekunden von der Erde gekommen ist, beträgt

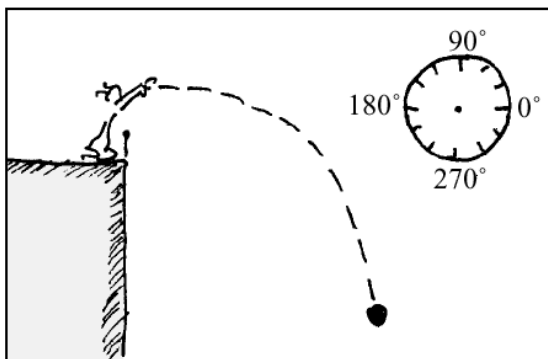
$p = F \cdot t = 5 \text{ Hy/s} \cdot 2 \text{ s} = 10 \text{ Hy}$ . Wir müssen nun addieren

$p_1 + p_2 = p_3$  wobei

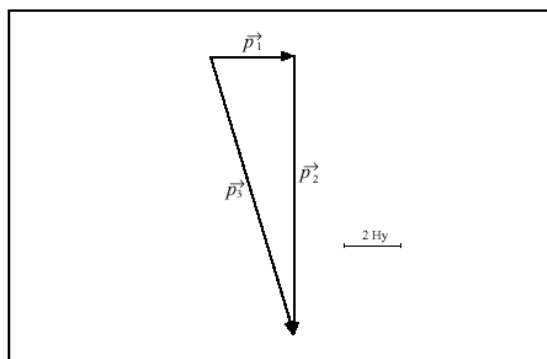
$p_1$ : 3 Hy  $0^\circ$ -Impuls

$p_2$ : 10 Hy  $270^\circ$ -Impuls ist.

*Abb. 6.16* zeigt die Lösung. Den Betrag des Gesamtimpulses können wir mit dem Satz von Pythagoras finden:



*Abb. 6.15.* Der Stein hat zu Anfang nur  $0^\circ$ -Impuls. Über das Schwerfeld bekommt er ständig  $270^\circ$ -Impuls hinzu.



*Abb. 6.16.* Vektorpfeile des Wurfvorgangs von *Abb. 6.15*

#### Abbildung 5.3.8

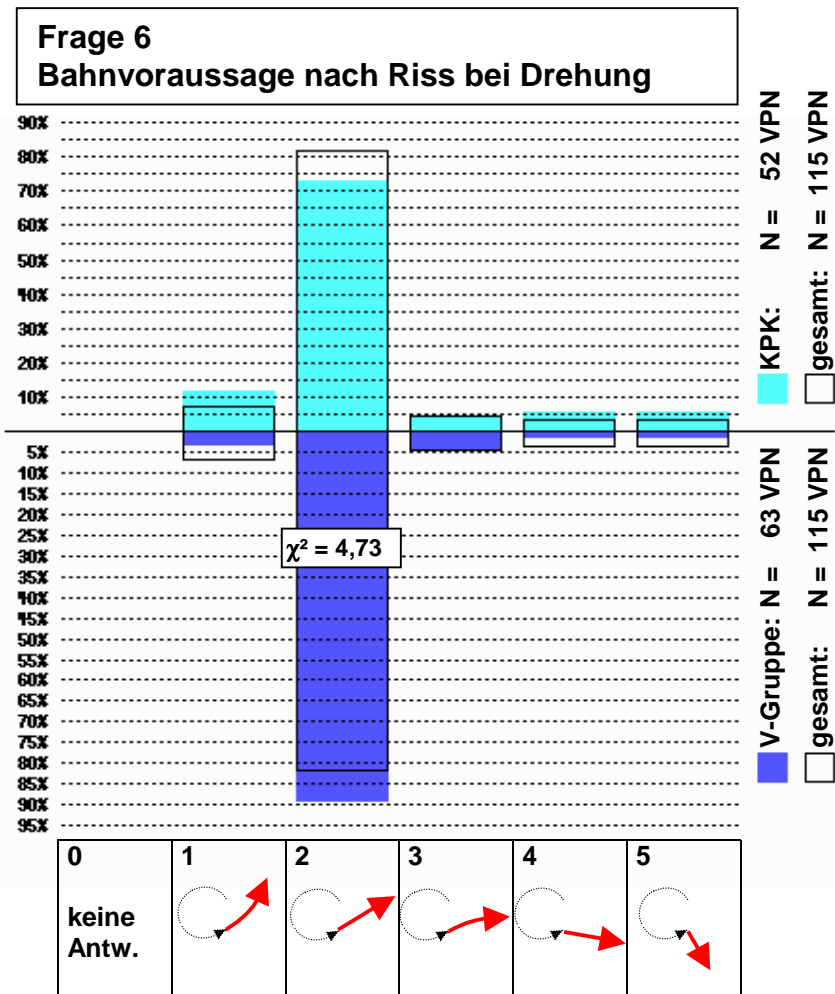
Behandlung des waagerechten Wurfs im Schülerband [HERR93a] des KPK.

Es existiert jedoch eine sehr grundlegende Schwierigkeit bei der Übersetzung der Impulsstromsprache in die der traditionellen Mechanik. Die zeitliche Änderung des Impulses  $dp/dt$  im Innern eines Raumbereiches ist gleich der Stärke des Impulsstroms  $I_p$  durch die Oberfläche des Bereichs:  $dp/dt = I_p$  (vgl. Abschnitt 5.2).

Fließt nun Impuls durch einen Impulsleiter (z.B. eine unter Spannung stehende Feder) in das Raumgebiet hinein oder aus ihm heraus, wird diese Impulsstromstärke traditionell „Kraft“ genannt. Der Impuls eines Raumgebietes kann sich aber auch dadurch ändern, dass in das Raumgebiet ein Massenstrom hineinfließt. Dieser an einen Materietransport gekoppelte Impulsstrom wird im KPK als „konvektiver Impulsstrom“ bezeichnet. Er unterscheidet sich vom sog. „konduktiven Impulsstrom“ (= Kraft) durch seine Bezugssystemabhängigkeit. Ein sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegendes Objekt transportiert den in ihm enthaltenen Impuls ja tatsächlich im Ortsraum. Diesem Impulstransport entspricht aber in der üblichen Beschreibung keine Kraft, denn Kräfte sind invariant gegenüber Galilei-Transformationen, konvektive Impulsströme nicht. Aus diesem Grund lassen sich einige der im Fragebogen vorkommenden Items (einschließlich Frage 12) gar nicht eindeutig in eine Beschreibung mit Kraftpfeilen übersetzen, wenn, und davon ist auszugehen, dieser Begriffsunterschied den Karlsruher VPN nicht bekannt ist.

Entsprechendes gilt für Frage 16c und einige Formulierungen in Frage 16 (Teil 2), falls dort „Kraft haben“ von einigen VPN mit „Impuls haben (und transportieren)“ assoziiert wurde (vgl. Abschnitt 5.3.3.3). Eine fehlende begriffliche Trennung zwischen Kraft und konvektivem Impulsstrom ergibt damit Beschreibungen im Sinne der mittelalterlichen „Impetustheorie“ (vgl. *Abbildung 5.3.3* im vorangegangenen Abschnitt).

Auch im Falle von Drehbewegungen könnte eine naive Deutung der mengenartigen Größe „Drehimpuls“ die Vorstellung von einer dem Körper innewohnenden Eigenschaft der Drehung „Zirkularimpetus“ begünstigen. Entsprechende Lösungen (Nr. 1) in Frage 6 finden sich etwas häufiger (10 %-Niveau) bei der Karlsruher Gruppe (*Abbildung 5.3.9*). Insgesamt ist der Anteil richtiger Voraussagen (KPK: 73 %, V-Gruppe: 89 %) bei der Vergleichsgruppe signifikant (5 %-Niveau) höher.



**Abbildung 5.3.9**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 6.

### B Situationen in denen zwei Körper betrachtet werden.

Wie in Abschnitt 4.4.2.1.3 diskutiert wurde, geht es in diesem Fragenkomplex (2, 7, 8, 9a, 9b, 13 und 14) u. a. um asymmetrischen Vorstellungen über Kräfte, die auf der Vermischung des Kraftbegriffes mit dem Energiebegriff beruhen. In den Fragen (2, 8 und 9a) werden Situationen aus der Dynamik gezeigt, bei denen rein energetische Überlegungen zu falschen Voraussagen führen können, wie z. B. „Der aktive (belebte, felderzeugende) Partner bewirkt eine Bewegung, die der Impulssatz verbietet“.

Der Vergleich der Fragen 7 und 13 ergab, dass im Falle korrekt vorausgesagter, unterschiedlicher Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen oft dennoch formal falsche Kraftpfeile zur Beschreibung gewählt wurden.

Die umgangssprachliche Einführung des Impulses durch die Synonyme „Schwung“ oder „Wucht“ im KPK lässt zunächst keine Abgrenzung z. B. zur kinetischen Energie erkennen. Später werden die mengenartigen Größen Impuls und Energie dadurch begrifflich getrennt, dass die Größe Impuls neben anderen (Drehimpuls, Elektrizität (= Ladung), Entropie) als Energieträger auftreten kann. Es wird deutlich gemacht, dass zwar die Größe Energie selbst nie allein strömt, ein Impulsstrom ohne Energiestrom jedoch häufig vorkommt. Z.B. fließt, wenn eine Person eine Kiste (mit konstanter Geschwindigkeit) über den Boden zieht, die Energie von der sich anstrengenden Person (mit dem Impuls als Träger) bis zur Kiste und erwärmt dort die Umgebung (Träger Entropie). Der im geschlossenen Stromkreis von der Kiste über den Boden zur Person zurückfließende Impuls trägt dann keine Energie. Ein (von Impuls getragener) Energiestrom existiert immer dann, wenn sich mindestens ein Teil der Impulsleitung bewegt. So fließt z. B. in den mechanischen Energiespeicher „Feder“ ein vom Impulsstrom (Stromstärke  $F$ ) getragener Energiestrom ( $P = F \cdot v$ ) hinein, wenn ein Ende der Feder (mit der Geschwindigkeit  $v$ ) bewegt wird. Neben elastisch verformten Körpern werden im Mechanikteil des KPK bewegte Körper und Felder (Schwerefeld) als Energiespeicher thematisiert [HERR93a].

Werden nur formal bzw. sachlich richtige Antworten betrachtet, ergibt sich für die einzelnen Fragen dieses Fragenkomplexes kein signifikanter Unterschied (5 %-Niveau) zwischen den Karlsruher Schülern und der V-Gruppe. Beide Stichproben erreichen bei ihren nonverbalen Voraussagen (*Abbildungen 5.3.10, 5.3.11, 5.3.12 und 5.3.13*) recht hohe Trefferquoten, bei den gewählten Kraftpfeilen in Frage 14 (*Abbildung 5.3.15*) mittlere und bei Frage 13 (*Abbildung 5.3.14*) in etwa gleich niedrige.

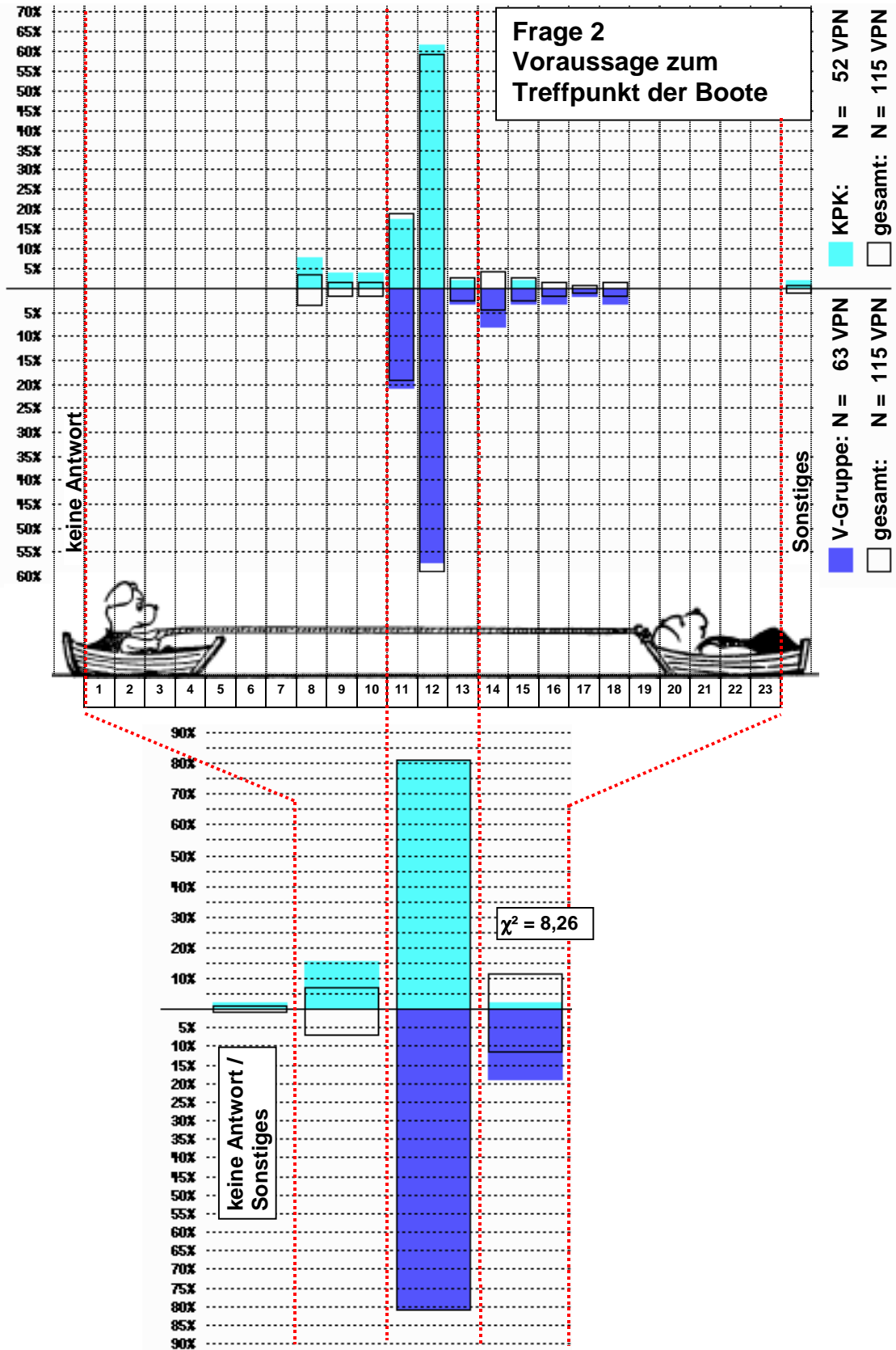
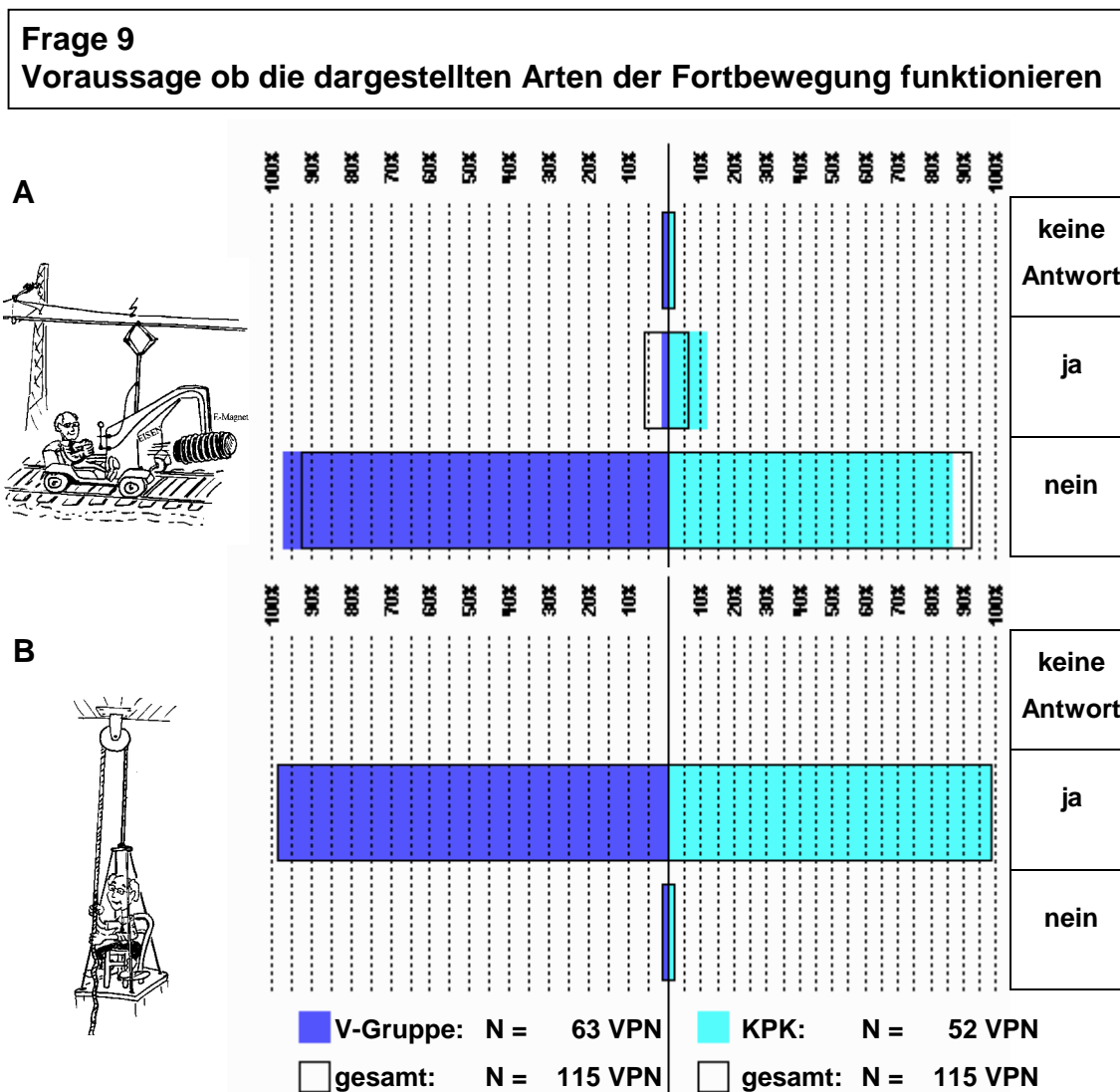


Abbildung 5.3.10

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 2.

Unterschiede ergeben sich lediglich bei einzelnen „falschen“ Lösungen. Da diese Felder (insbesondere bei Fragen aus Teil 1 des Fragebogens) aber recht schwach besetzt sind, ist eine sehr vorsichtige Interpretation angebracht.

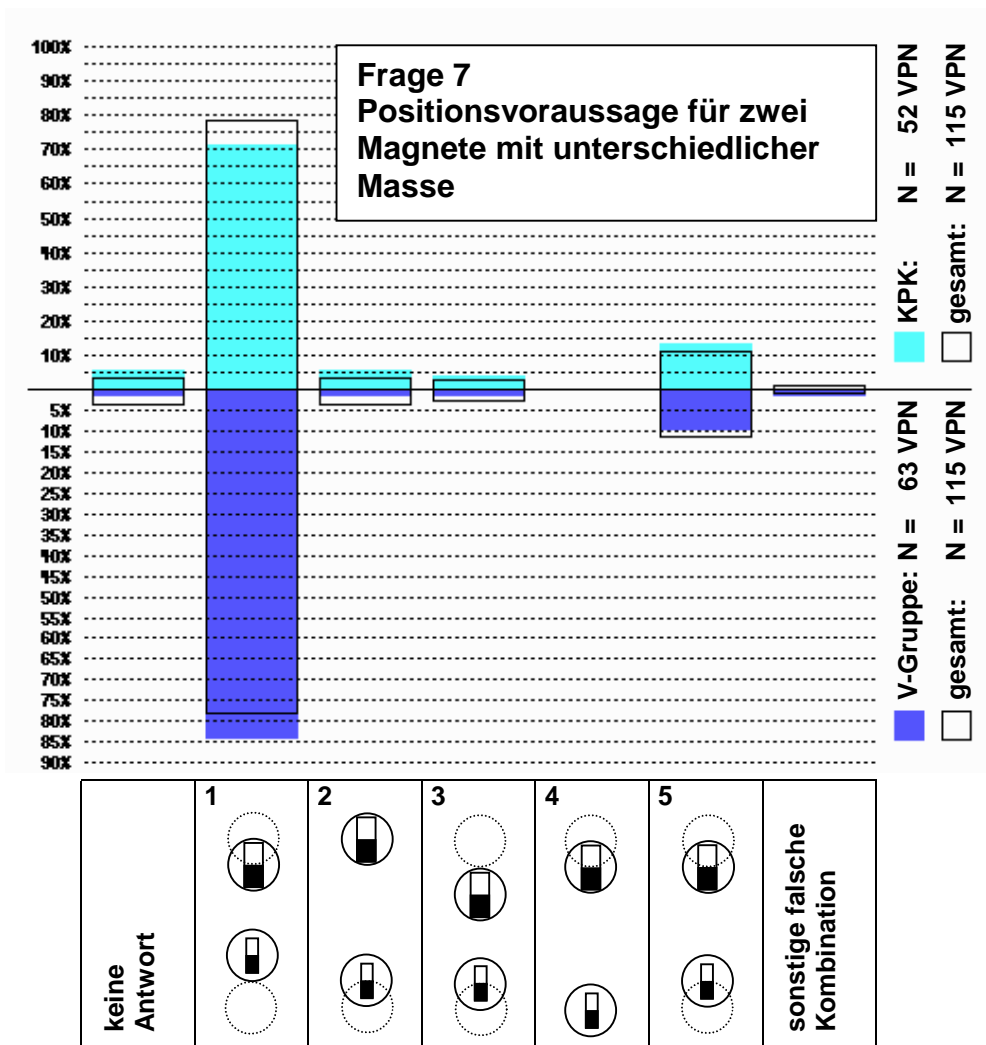


**Abbildung 5.3.11**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 9.

Bei den symmetrischen Fragen 2 und 8 tendieren Karlsruher Schüler mit falschen Voraussagen eher dazu dem Körper, der die Energie zur Verfügung stellt (ziehende Person, felderzeugender Magnet), die höhere Geschwindigkeit zuzusprechen. Eventuell in dem Sinne, dass das Ende der Impulsleitung (Seil, bzw. Magnetfeld), an dem der Energiespeicher sitzt, sich schneller bewegt (Abbildungen 5.3.10, 5.3.13).

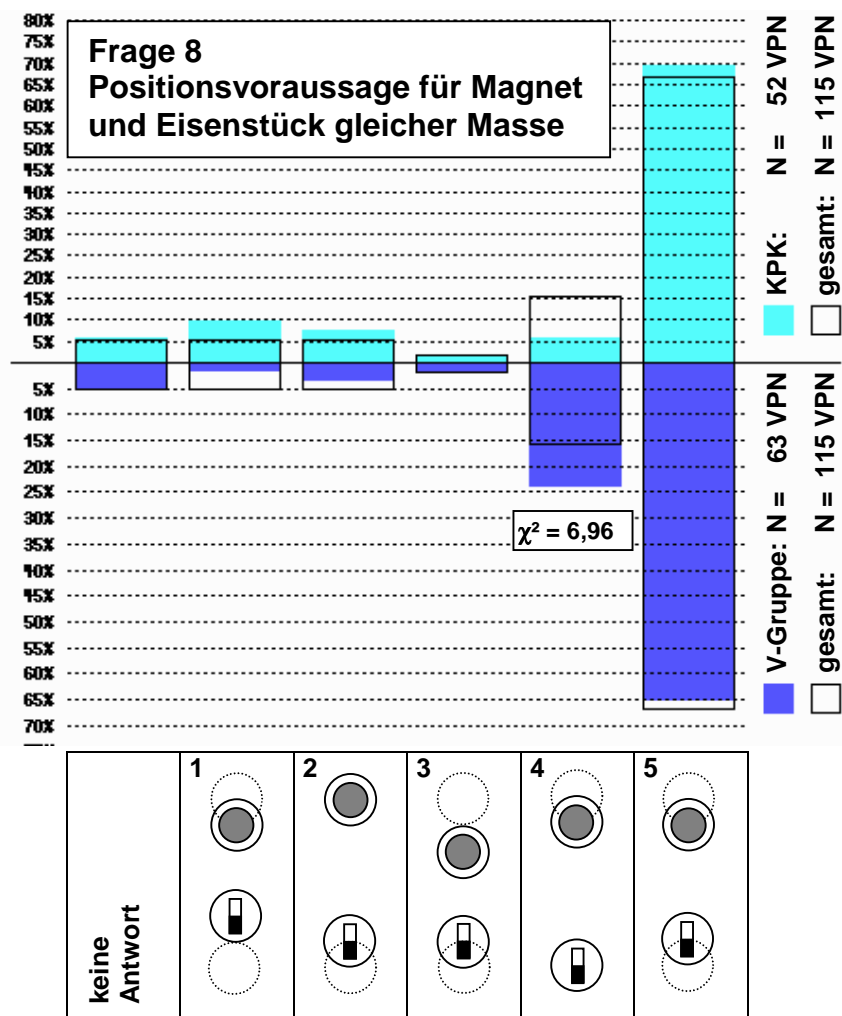
In Frage 9a sagen 6 VPN der Karlsruher Gruppe die dargestellte Art der Fortbewegung funktioniert. Vielleicht haben die in dieser Anordnung vorhandenen Energie- (kommt von Kraftwerk und heizt die Spule), Ladungs- (Kommt von Kraftwerk und geht über die Schienen dahin zurück) und Impulsströme (geschlossen über verspannten Ausleger und Magnetfeld) hier einige Schüler verwirrt (Abbildung 5.3.11).



**Abbildung 5.3.12**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 7.

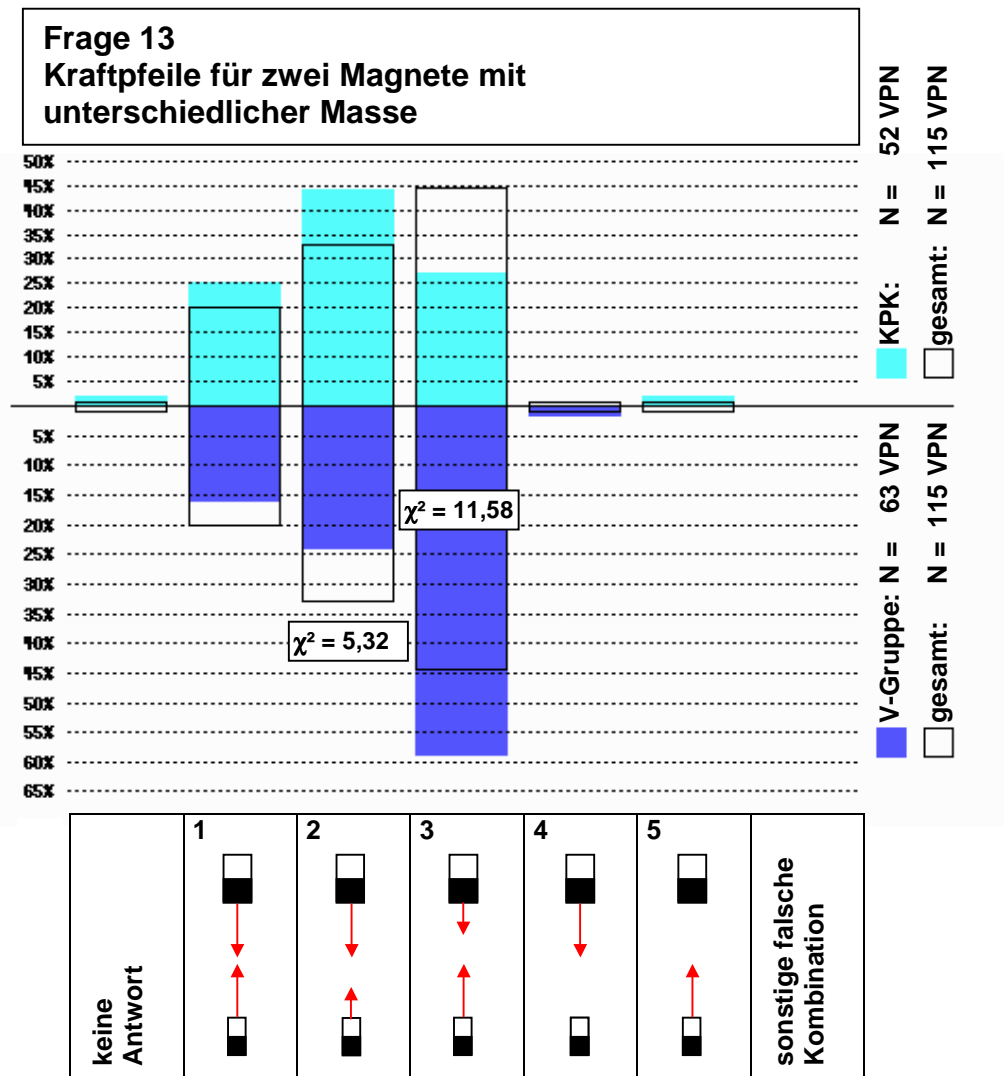




**Abbildung 5.3.13**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 8.

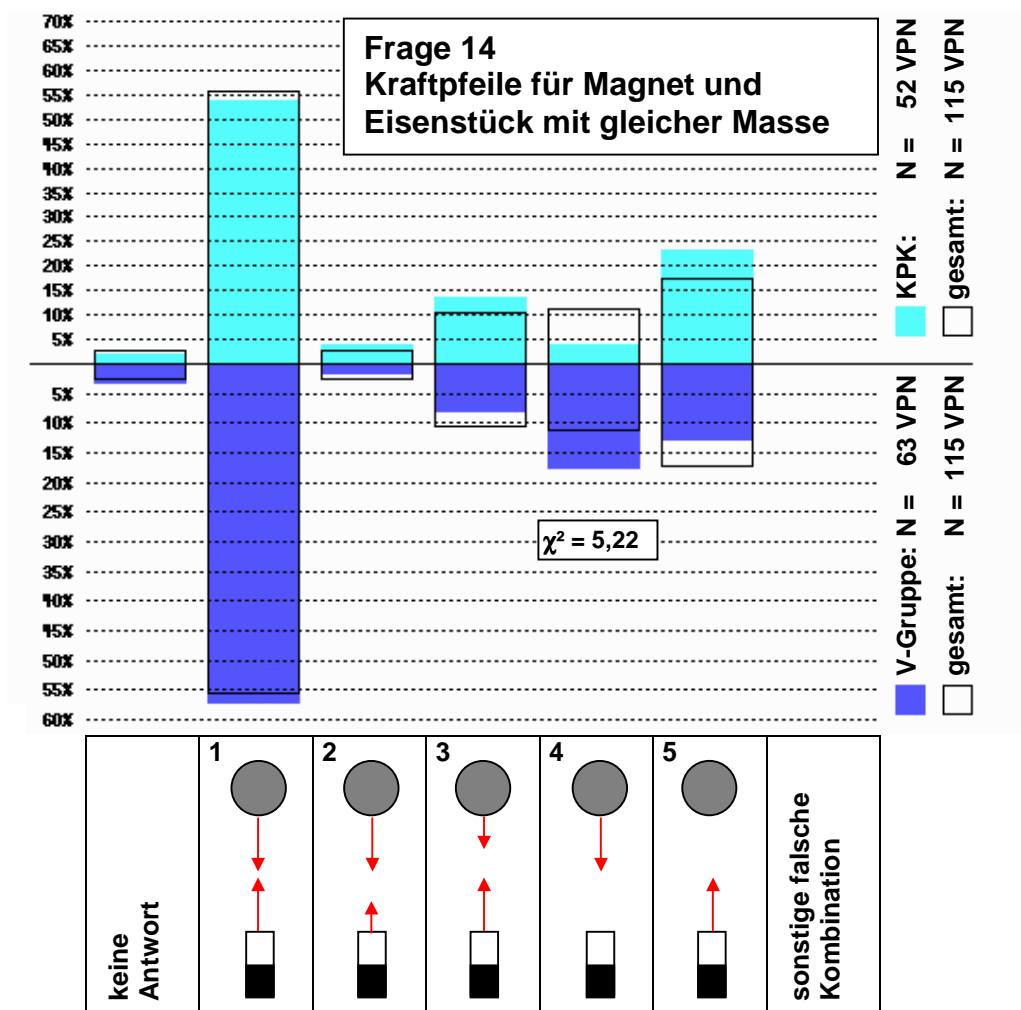
Wie die Abbildungen 5.3.14 und 5.3.15 auf den folgenden Seiten zeigen, wählt die Karlsruher Gruppe von den falschen Kraftpfeilen häufiger solche, die vom Körper mit der größeren Feldenergie (Magnet in Frage 14, größerer Magnet in Frage 13) ausgehen.



**Abbildung 5.3.14**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 13.

Bei Frage 13, in der sich die Körper tatsächlich unterschiedlich schnell bewegen, ist der Unterschied besonders deutlich (0,1 %-Niveau). Die Vergleichsgruppe ordnet dagegen mehrheitlich (58,7 %), wie die Teilstichproben der Haupterhebung (Abschnitt 4.4.2.1.3), hier den größeren Kraftpfeil dem schnelleren Körper zu.

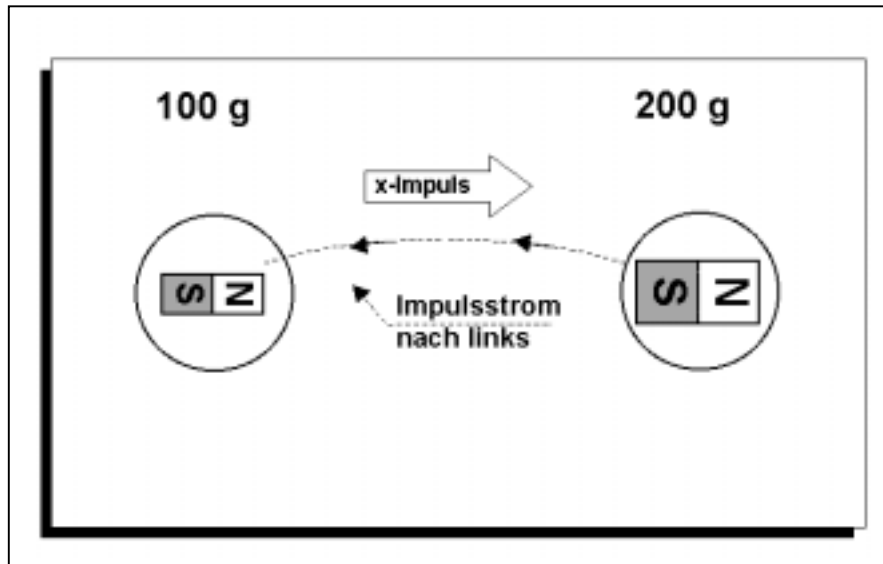


**Abbildung 5.3.15**

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 14.

Dieses unterschiedliche Antwortverhalten bleibt auch bestehen, wenn nur die 90 VP betrachtet werden, die den entsprechenden Sachverhalt in Frage 7 korrekt vorhersagten. Die formal korrekten Kraftfeile kommen bei beiden Teilstichproben als dritthäufigste Variante vor, jedoch häufiger in der Karlsruher Gruppe (Frage 7 und Frage 13 richtig: KPK 17,3 %, V-Gruppe: 9,5 %). Dabei ist zu beachten, dass eine dem KPK entsprechende symbolische Beschreibung der Situation (siehe *Abbildung 5.3.16*) nicht als Antwortalternative vorgegeben

wurde. Es ist m.E. sogar zu bezweifeln, dass die VPN entgegengesetzt gleiche Impulspeile gewählt hätten, wenn statt nach Kräften nach Impulsen gefragt worden wäre.



**Abbildung 5.3.16**

*Symbolische Beschreibung der Situation in Frage 7 bzw. 13 im Impulsstrommodell:  
 x-Impuls fließt vom rechten Magneten durch den nicht genauer betrachteten Impulsleiter  
 Magnetfeld zum linken Magneten. Da beide Magnete gegenüber der Umgebung impulsisoliert  
 sind, häuft sich der x-Impuls, den der rechte Magnet abgibt, im linken Magneten an. Die zwei  
 Magnete besitzen folglich in jedem Augenblick entgegengesetzt gleiche Impulse.*

### 7.2.2. Statik

Die Ergebnisse physikalisch vorgebildeter Personen in Abschnitt 4.4.2.2 zeigten die Wirkungslosigkeit des traditionellen Mechanikunterrichtes bei der Lösung des statischen Problems in Frage 3. Die Vergleichsbefragung ergibt nun, dass die Karlsruher Schüler in diesem Punkt noch wesentlich häufiger die falsche Voraussage (Nr. 3) treffen (*Abbildung 5.3.17*). Die falsche Lösungsalternative (Nr. 3) sollte VPN erfassen, deren Lösungsstrategie von der Gewichtskraft der angehängten Massen dominiert wird und die die Funktion der Decke im gezeigten Beispiel nicht durchschauen. Sie müssten zu dem Schluss kommen: Zwei Gewichte bedeuten doppelte Kraft, also reißt der Faden. Wenn andererseits in der Vorstellung das bei der Beschreibung mit Kräften gewohnte "Gleichgewichtspaar" dominiert, könnte man ebenfalls in die Versuchung geraten, diese Kräfte zu addieren. Das führt aber nicht zwangsläufig zur Voraussage: „Der Faden reißt.“ Denn man kann diese gedankliche Addition in allen Situationen durchführen, also auch wenn das Gewichtsstück an der Decke hängt. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass in der Voruntersuchung häufig Studierende mit ansonsten recht guten Physikkenntnissen die Lösung „Der Faden reißt“ wählten. Auch in der Karlsruher Gruppe erreichen Schüler mit der falschen Voraussage (Nr.3) eine geringfügig höhere Trefferquote (SRV-Index) bei den restlichen Items. Woran liegt es, dass gerade diese Schüler nun statt der Kräfte vermutlich Impulsstromstärken bzw. Impulsströme addieren?

Zunächst sollte man vermuten, dass jemand, der den Umgang mit Impulsströmen gewohnt ist, bei dieser Frage eher weniger Schwierigkeiten bekommt. Im Gegensatz zu traditionell unterrichteten Schülern dürften die Karlsruher Schüler wissen, dass bei dem Gewicht an der Decke ein Impulsstrom der Stärke  $150 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg}$  durch den Faden fließt. Entsprechende eindimensionale Anordnungen, die Belastung von Impulsleitern sowie das Schwerfeld werden im KPK ausführlich behandelt. Mit der ebenfalls im Karlsruher Schülerband vorkommenden Regel: „*Wenn ein Seil über ein frei drehbares Rad (eine Rolle) läuft, sind die Impulsströme in den beiden Teilen des Seils vom gleichen Betrag.*“ ließe sich dann die richtige Impulsstromstärke im Seil angeben.

Ohne diese Regel wären die Umlenkrollen allerdings nur „Knoten für Impulsströme“ und die „Knotenregel“ besagt lediglich, dass die hinein- und herausfließenden Impulsströme zusammen null ergeben müssen, wenn sich im Knoten kein Impuls anhäuft, d. h. der Knoten nicht beschleunigt wird. Seile können aber nur Impuls, der parallel zum Seil liegt, leiten und den nur in eine Richtung, denn Seile sind nur auf Zug, nicht aber auf Druck belastbar. Bei der gestellten Aufgabe handelt es sich um ein zweidimensionales Problem. Wären die Umlenkrollen mit einem Seil an der Decke befestigt, anstatt mit starren Stangen am Tisch, würde dieses Seil sich unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Decke einstellen und man könnte das Problem geometrisch mit Hilfe der Knotenregel (traditionell: Regel vom Kräftedreieck) lösen. Die am Tisch befestigten Halterungen können als starre Körper jedoch Impulse beliebiger Richtungen leiten, so dass es nicht möglich ist vorherzusagen, wie sich der vom angehängten

Gewichtsstück kommende Impuls im Knoten aufteilt (Kräftedreieck, bei dem lediglich eine Seite und der rechte Winkel bekannt ist). D.h. gerade Schüler, die den Impuls als „Substanz“, die aus dem Schwerefeld in die angehängten Gewichte strömt, ernst nehmen, und die die sachlich falsche, aber hier hilfreiche traditionelle Schulbuchregel „Kräfte werden durch Rollen umgelenkt“ [DORN93] nicht verwenden, kommen in Schwierigkeiten. Lediglich die Annahme, dass Teile des einströmenden Impulses auf komplizierten Wegen durch die unter Druckspannungen stehenden Teile des Tisches abgeleitet werden, könnte intuitiv zur richtigen Voraussage führen.

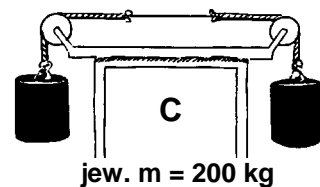
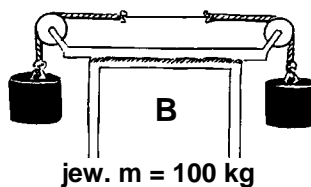
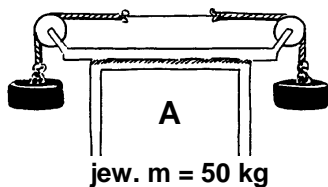
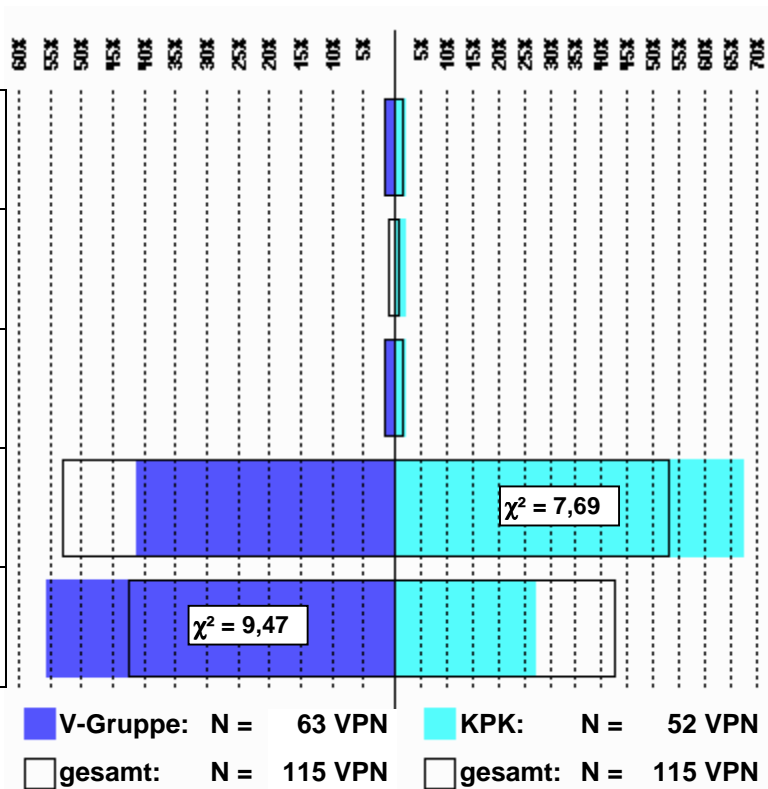
**Gegeben:**

In diesem Experiment reißt der Faden bei  $m > 150$  kg



**Frage 3**  
Voraussage ob ein genau gleicher Faden auch bei den Experimenten A, B oder C reißt

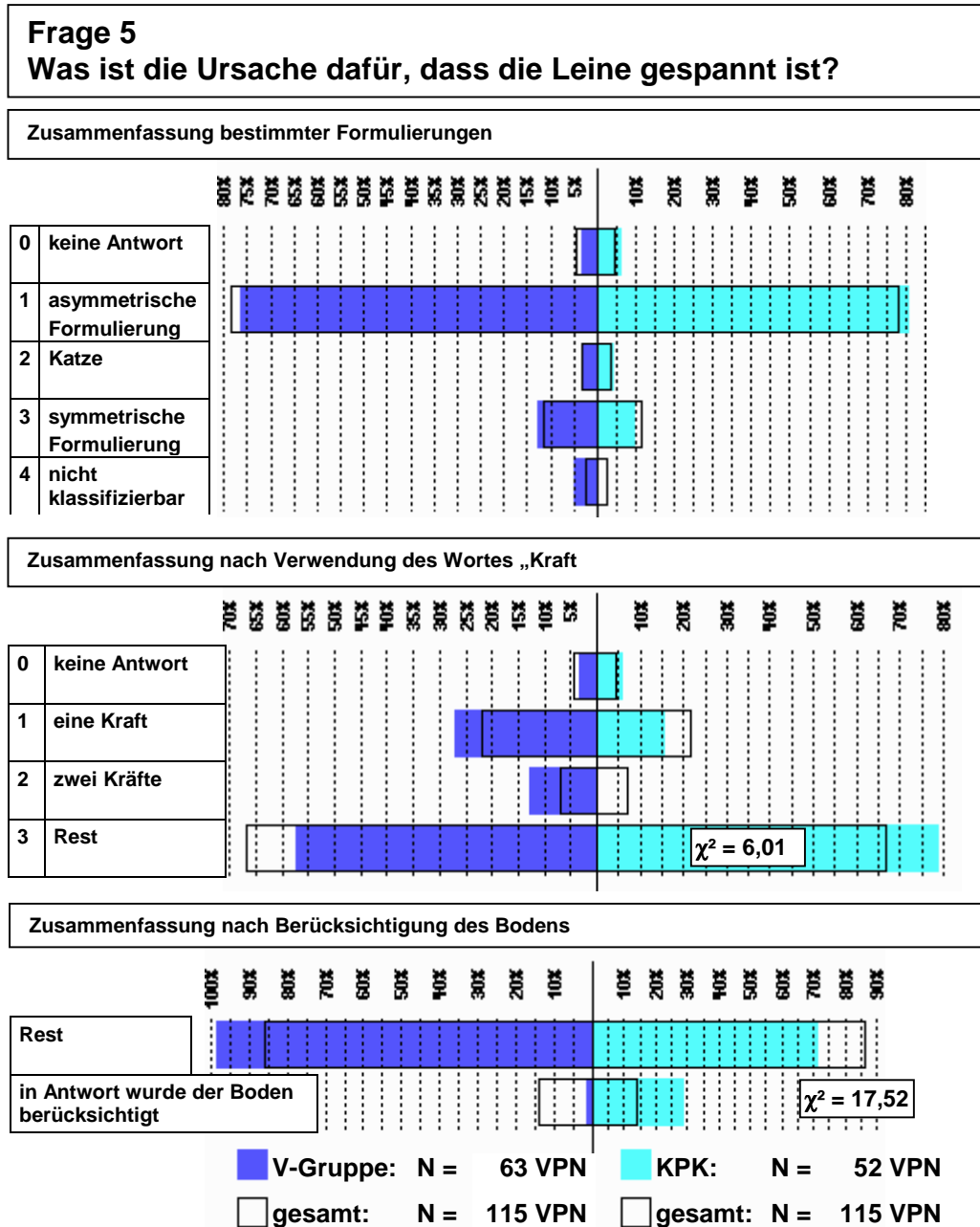
|   |  |
|---|--|
| 0 | keine Antwort / Sonstiges                                  |
| 1 | Faden reißt in allen 3 Fällen                              |
| 2 | Faden reißt in keinem Fall                                 |
| 3 | Faden reißt nicht bei A, reißt bei C und reißt bei B       |
| 4 | Faden reißt nicht bei A, reißt bei C und reißt nicht bei B |



**Abbildung 5.3.17**

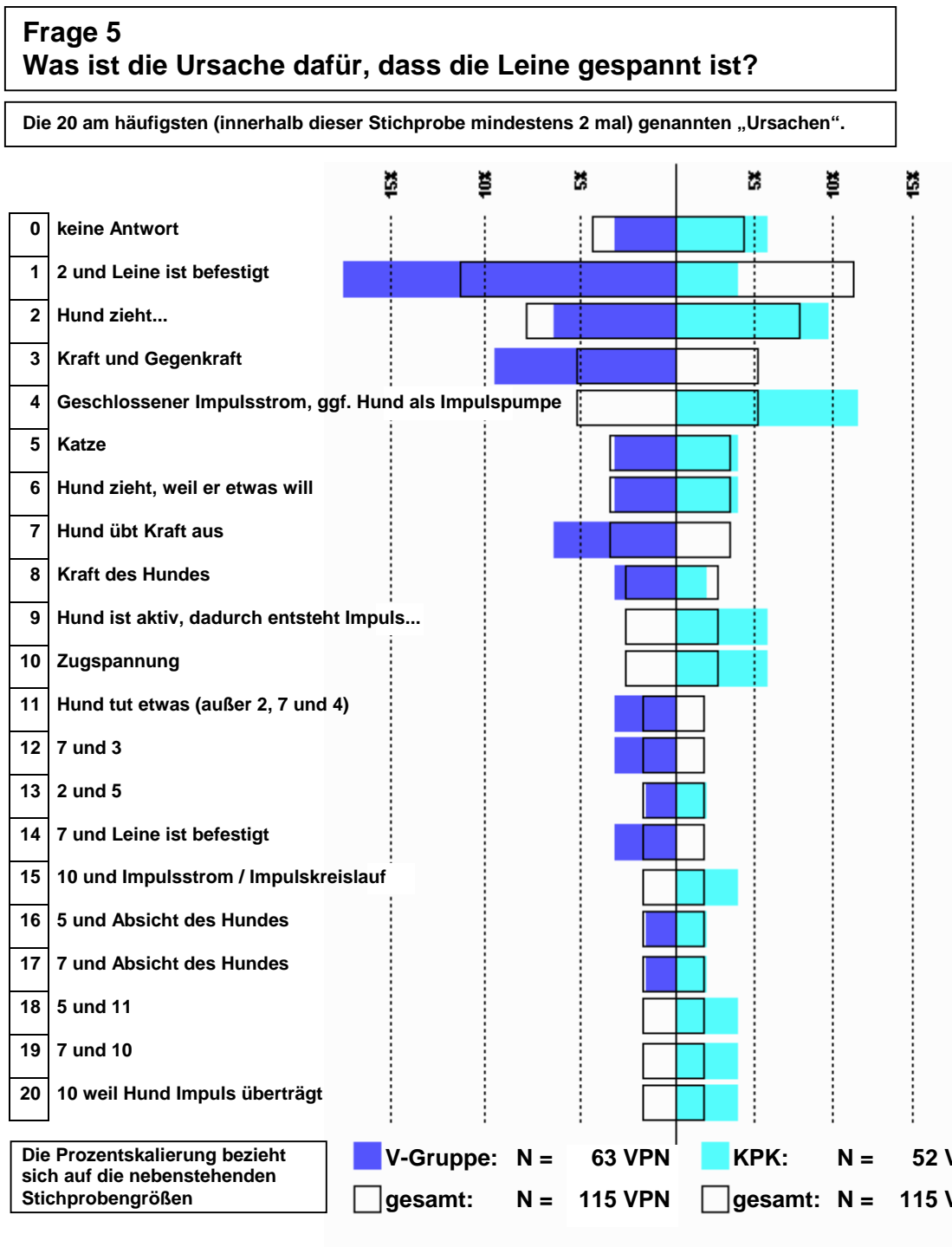
Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 3.

Dass ein Teil der Karlsruher Gruppe Druckspannungen in statischen Anordnungen berücksichtigt, ergeben die freiformulierten Antworten auf Frage 5. Die Antworten auf diese offene Frage zeigen deutlich einen der Vorteile des Karlsruher Konzeptes. Während auf die Frage nach der „Ursache“ eines Vorgangs von allen Befragten eine asymmetrische Antwort („der Hund zieht...“, „... will ...“, „... übt Kraft aus ...“), häufig unter Vermeidung des Wortes „Kraft“, bevorzugt wird (*Abbildung 5.3.18 oben*), erlaubt die Sprache des KPK hier eine asymmetrische Antwort, die dennoch physikalisch korrekt ist.



**Abbildung 5.3.18**

*Vergleich der zusammengefassten Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 5.*



**Abbildung 5.3.19**

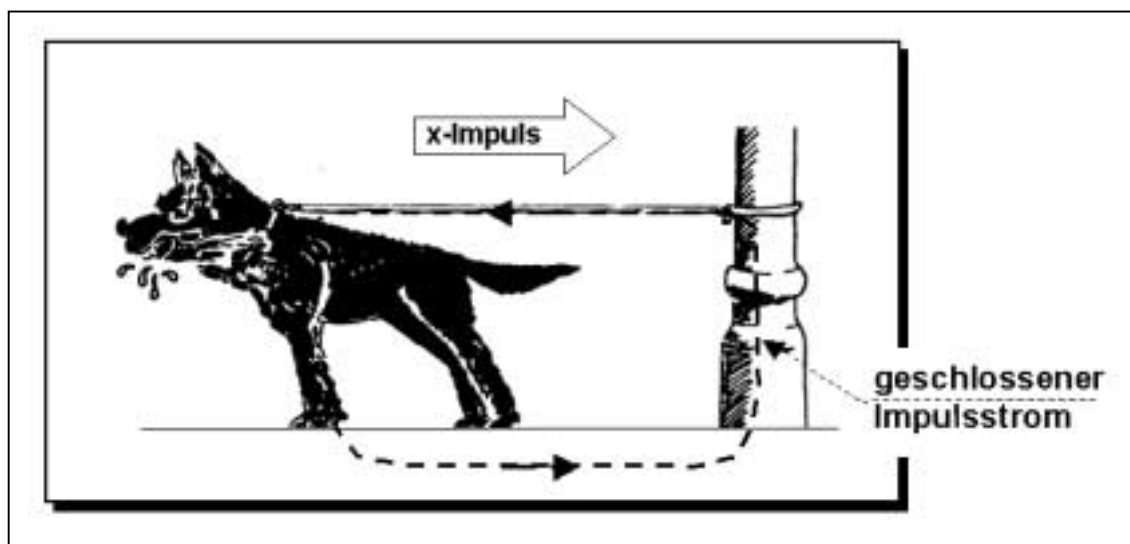
Vergleich der 20 häufigsten (innerhalb dieser Stichprobe  $N = 115$  VPn mindestens 2 mal genannten) Antworten auf Frage 5. Dargestellt sind nur die Antworten von 38 Karlsruher Schülern (KPK) und 42 traditionell unterrichteten Schülern (V-Gruppe). Zur detaillierten Codierung der Antwortklassen vgl. Tabelle 4.4.3 auf Seite 149.



Im Bild eines geschlossenen Impulskreislaufs übernimmt der Hund die Funktion einer „Impulspumpe“. Demzufolge wird von knapp einem Drittel der Karlsruher Schüler der (unter Druckspannung stehende) Fußboden in die Betrachtung einbezogen. Wie erwartet kommt das Wort „Kraft“ als Ursache häufiger bei der traditionell unterrichteten Vergleichsgruppe vor. „Zwei Kräfte“ werden ausschließlich von der Vergleichsgruppe genannt (*Abbildung 5.3.18*).

Die Klassifizierung der einzelnen „Ursachen“ wurde bereits in Abschnitt 4.4.2.2 (vgl. *Tabelle 4.4.3*, S 149) dargestellt. Sie erfolgte auf der Basis der Gesamterhebung (N = 511 VPN) und ist deshalb für die individuelle Sprache der Karlsruher Schüler weniger geeignet. Aus der Verteilung der 20 häufigsten (innerhalb der hier betrachteten Teilstichprobe mindestens zweimal genannten) „Ursachen“ in *Abbildung 5.3.19* erkennt man jedoch bei Antworten, in denen physikalische Begriffe vorkommen, dass die beiden Teilstichproben unterschiedliche Fachsprachen verwenden. Von den 49 Antworten der Karlsruher Gruppe haben 36,7 % einen erkennbaren Bezug zur Sprache des KPK. Eine gesonderte Liste mit den Antworten der Karlsruher Gruppe befindet sich im Anhang (A.2, S A50).

Eine formal korrekte Beschreibung der dargestellten Situation (Frage 15) mit symmetrischen Kraftpfeilen gelingt lediglich einem Viertel der Karlsruher Schüler, während 68,3 % der herkömmlich unterrichteten Schüler diese wählen (*Abbildung 5.3.21*). Der signifikante Unterschied (1 %-Niveau) ist nicht verwunderlich, da die Situation im Impulsstromkonzept immer formal asymmetrisch beschrieben wird. Eine der Karlsruher Symbolik entsprechende Lösungsalternative, wie in *Abbildung 5.3.20* gezeigt, fehlte jedoch in Frage 15.



**Abbildung 5.3.20**

*Symbolische Beschreibung der Situation in Frage 15 im Impulsstrommodell.*

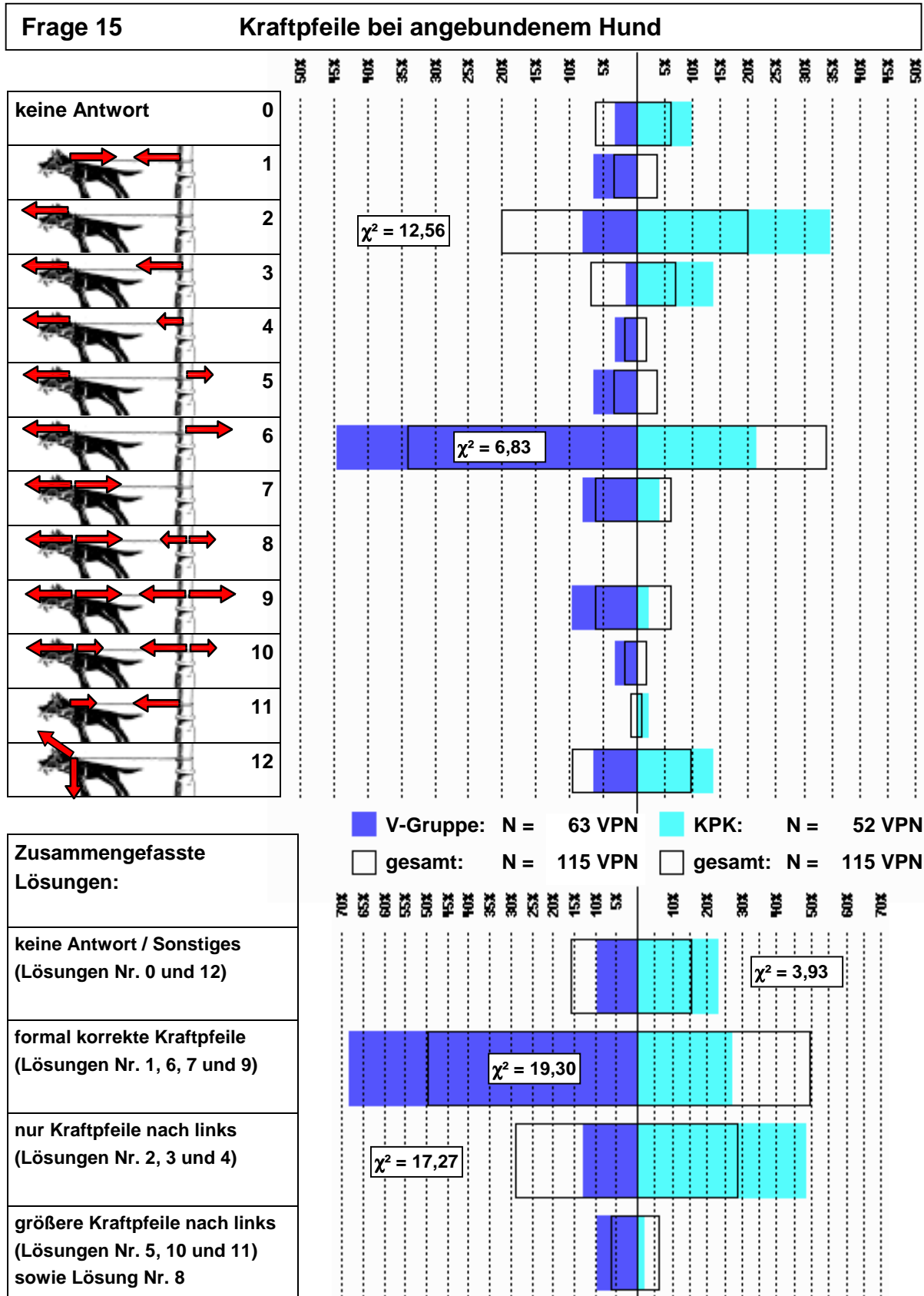


Abbildung 5.3.21

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 15.

Die von den Karlsruher Schülern gewählten Lösungen dürfen daher nicht einfach als falsch gewertet werden, wenn diese vergeblich versuchten, eine Darstellung zu finden, die ihrem Modell am nächsten kommt. Falls ferner die Übersetzung des 3. Newtonschen Axioms im Unterricht nicht behandelt wurde, ist gar nicht zu erwarten, dass nach dem KPK unterrichtete Schüler zwei vom gleichen Impulsstrom durchflossenen Körpern zwei entgegengesetzt gleiche Kräfte zuordnen können. Die keineswegs triviale Vorzeichenfestlegung der Impulsstromstärke durch die entsprechende Wahl der Flächenorientierung (vgl. Abschnitt 5.2) kann in der Schule generell nicht thematisiert werden.

Damit dürfte für die Karlsruher Schüler der Begriff „Kraft“ eine noch nebulösere Bedeutung besitzen als für die Vergleichsgruppe. Möglicherweise begünstigen diese formalen Schwierigkeiten bei der Übersetzung zwischen Impulsstrom- und Kraftmodell die bei der traditionellen Einführung des Kraftbegriffes in der Mittelstufe üblichen Vermischungen von „Kraft“ mit „Energie“.

### 5.3.3.3 Assoziationen und Kontext zum Wort „Kraft“

In der Darstellung der Mechanik nach dem KPK taucht das Wort „Kraft“ lediglich kurz als weit verbreiteter, anderer Name für die Größe „Impulsstromstärke“ auf. Das hat natürlich Auswirkungen auf die genannten Assoziationen zum Wort „Kraft“. Von den Karlsruher Schülern werden deutlich seltener schulrelevante Begriffe aus dem traditionellen Mechanikunterricht, wie Beschleunigung, bestimmte Kräfte (z.B. Anziehungskraft) und Formeln (z.B.  $F = m \cdot a$ ) genannt. Assoziationen zum Impulsbegriff treten dagegen nur bei der Karlsruher Gruppe auf (vgl. *Abbildung 5.3.22*). Auch Nennungen, die den Vektorcharakter betonen, kommen bei ihnen häufiger vor. Alltagsbegriffe, die z.B. mit körperlicher Stärke zu tun haben, werden von beiden Teilstichproben gleichhäufig genannt.

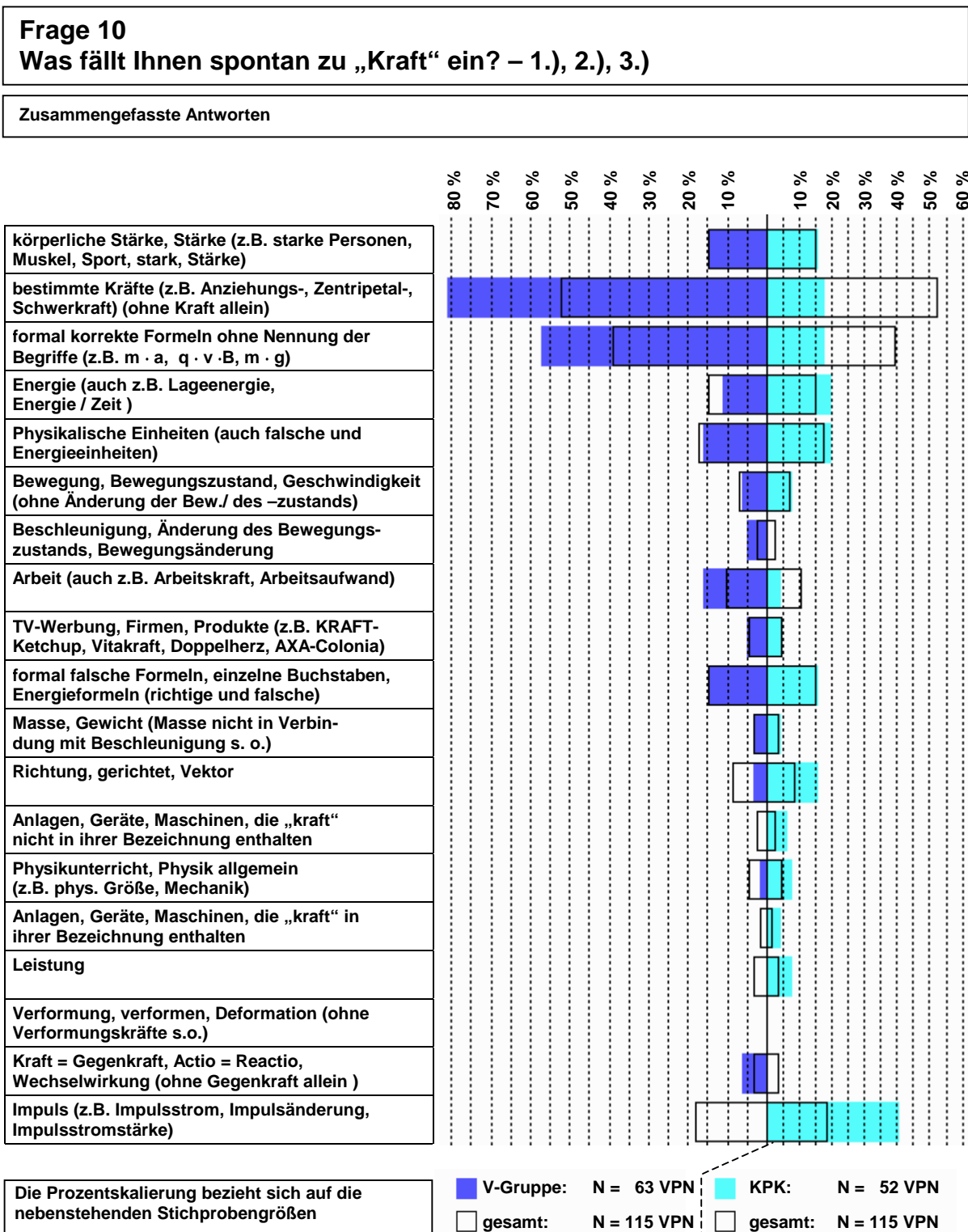
Die Antworten auf die Fragen 10 und 11, die einen Bezug zum Impulsstromkonzept erkennen lassen (vgl. *Tabelle 5.3.2*), deuten darauf hin, dass bei der Übersetzung des Wortes „Kraft“ häufig nicht begrifflich zwischen Impuls, Impulsstrom und Impulsstromstärke getrennt wird. Der Aspekt der Impulsänderung fehlt völlig. Auch als Formel taucht (wie im Schülerband des KPK) lediglich  $F = p / t$  auf. Von den 33 in Frage 10 genannten Assoziationen mit sprachlichen Bezug zum KPK beschreiben 14 Aspekte des Impulses.

| <b>Antwort auf Frage 10 (Teil 1),<br/>„Was fällt Ihnen spontan zu Kraft<br/>ein?“</b> |   | <b>Antwort auf Frage 10 (Teil 2),<br/>„Bilden Sie 3 beliebige Sätze, die das<br/>Wort Kraft enthalten“</b>   |  |
|---|---|--|--|
| <b>Häufigkeit</b>   | <b>33 (von 126) Antworten<br/>aus physikalischem Bereich mit<br/>sprachlichen Bezug zum KPK</b> | <b>12 (von 84) Antworten<br/>mit sprachlichen Bezug zum KPK</b>  |  |
| 7   | Impuls  | Kraft pumpt Impuls von einem Ort zum anderen.  |  |
| 6   | Impulsstromstärke   | Beim Kraftausüben wird Energie umgeladen.  |  |
| 3   | $F = p / t$   | Kraft ist der Impuls pro Zeit.   |  |
| 2   | ist ein Energieträger.  | Kraft ist ein Impulsstrom.   |  |
| 1   | fließt von hoher zu niedriger<br>Konzentration.   | Kraft ist Energieträger.   |  |
| 1   | Kraft benötigt einen Leiter.  | Kraft ist ein anderes ... für Impulsstromstärke.   |  |
| 1   | $P = \text{Kraft}$  | Kraft ist ein Energieträger.   |  |
| 1   | Zugspannung, Druckspannung  | Kraft ist ein veralteter Ausdruck für eine<br>physikalische Größe.   |  |
| 1   | alte physikalische Einheit  | Durch Muskelkraft wird Impuls aus Erde gepumpt.  |  |
| 1   | Energie wird umgeladen.   | Impulsstromstärke ist ein Energieträger.   |  |
| 1   | Energiestrom  | Kraft kann fließen.  |  |
| 1   | Durch Impuls erzeugt.   | Jeder Kraftstrom wird von einem Energiestrom<br>begleitet.   |  |
| 1   | Durch Kraft wird Impuls gepumpt.  | <b>Antwort auf Frage 11,<br/>„Können Sie sich aus Ihrer Schulzeit an<br/>einen beliebigen Satz aus dem<br/>Physikunterricht erinnern, der das Wort<br/>Kraft enthält?“</b> |  |
| 1   | Impuls eines Körpers  | Ja, und zwar:  |  |
| 1   | Impulskraft   | <b>3 (von 9) Antworten mit Bezug zum KPK</b>   |  |
| 1   | Impulsstrom   | Kraft ist heutzutage als Impulsstromstärke<br>bezeichnet.  |  |
| 1   | ist das gleiche wie Impuls  | Kraft ist ein anderer Begriff für Impulsstromstärke.   |  |
| 1   | Kraft ist out. Impuls ist in.   | Kraft ist ein Impulsstrom.   |  |
| 1   | Kraft kann man mit Impuls vergleichen.  |  |  |

**Tabelle 5.3.2**

*Antworten der Karlsruher Schüler mit Bezug zur Sprache des KPK auf die offenen Fragen 10 und 11.*

Interessant ist ferner, dass „Kraft“ häufig im Zusammenhang mit „Impulspumpen“ gesehen wird. Dahinter dürfte sich wieder die energetische Bedeutung des Alltagsbegriffes verbergen, denn Impulspumpen (Lebewesen, Maschinen) verfügen über Energie („haben Kraft“).



**Abbildung 5.3.22**

Zusammengefasste Assoziationen auf Frage 10 (Teil 1). Die 19 Antwortklassen enthalten 257 der 301 Nennungen, die insgesamt innerhalb dieser Teilstichprobe vorkamen. Dargestellt sind 106 Nennungen von Karlsruher Schülern (KPK) und 151 Nennungen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe).

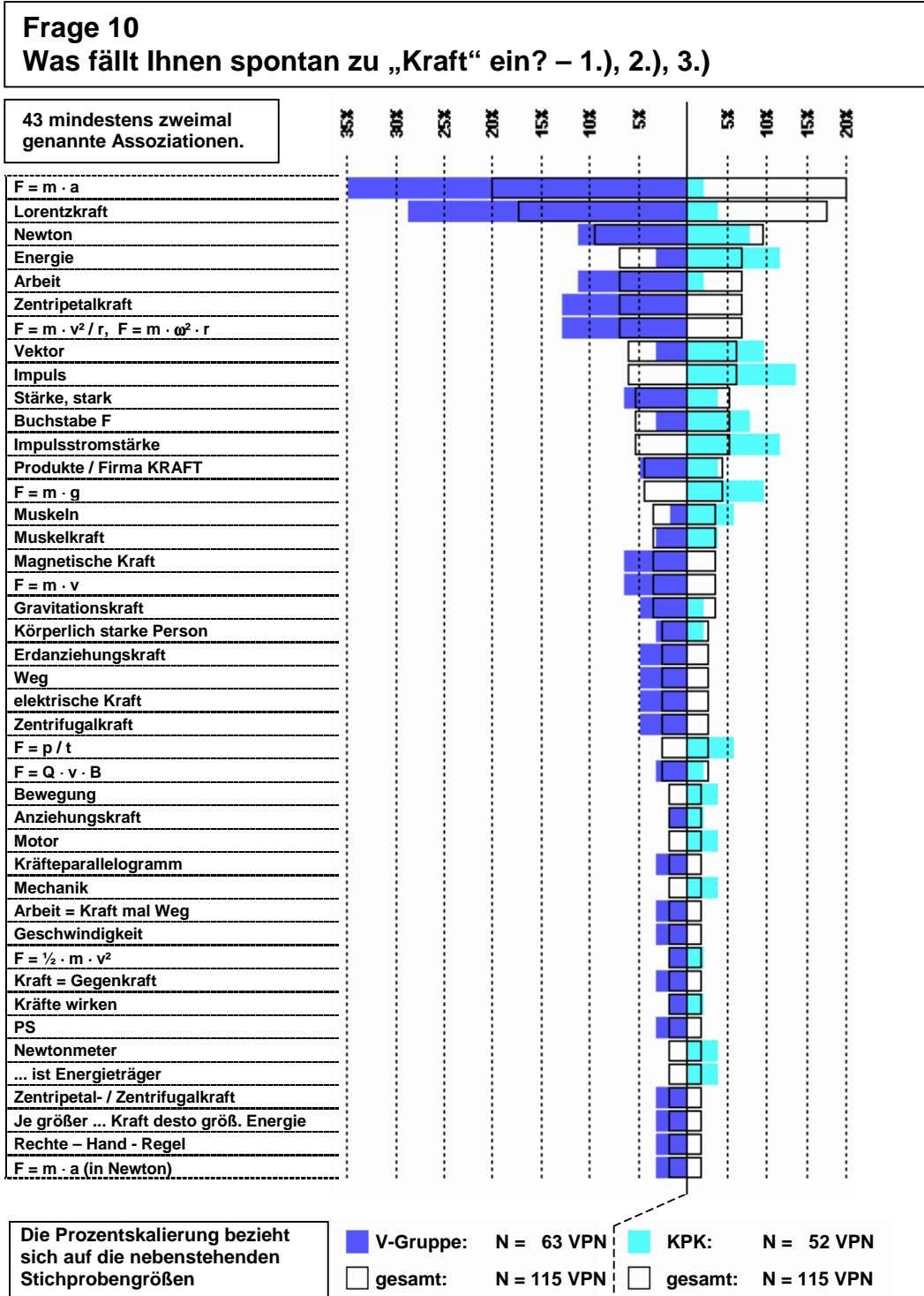


Abbildung 5.3.23

43 innerhalb dieser Stichprobe (N = 115 VP) mindestens 2 mal genannte Assoziationen auf Frage 10 (Teil1). Den dargestellten Assoziationen entsprechen 203 Nennungen (von 301 Nennungen, die insgesamt innerhalb dieser Teilstichprobe vorkamen).

Auch bei der Beurteilung vorgegebener Aussagen fällt auf, dass die Karlsruher Schüler - deutlich häufiger als die Vergleichsgruppe - bewegten Körpern (laufende Billardkugel: 5 %-Niveau, anfahrendes Auto: 1 %-Niveau) die Eigenschaft „Kraft haben“ zugestehen (Abbildung 5.3.24).

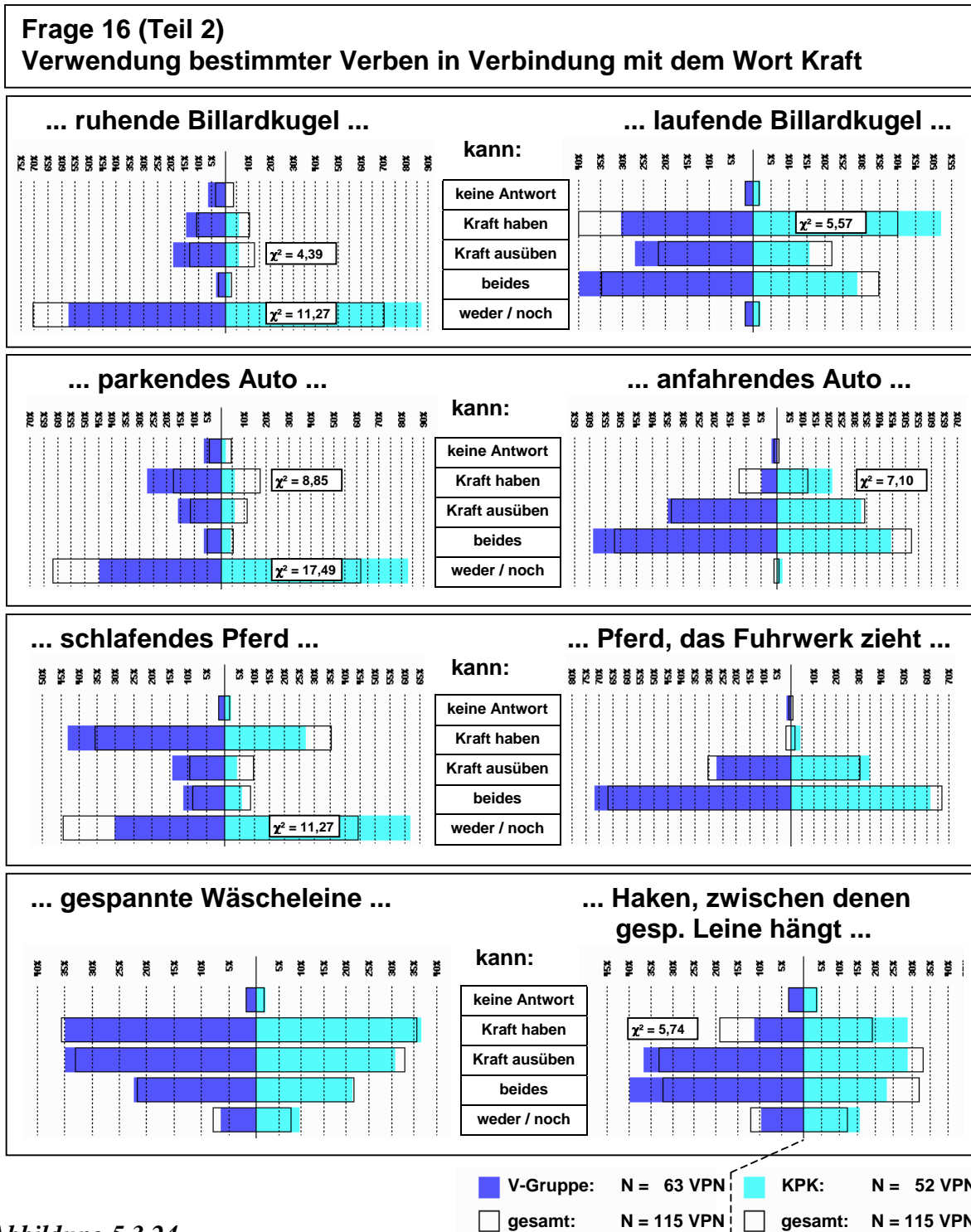


Abbildung 5.3.24

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 16 (Teil 2).

Die in der Karlsruher Gruppe etwas häufigere Zustimmung zur Aussage in Frage 16c „Ein Körper bewegt sich nur solange eine Kraft auf ihn einwirkt.“ (Abbildung 5.3.25) passt ebenfalls gut in ein Begriffskonzept, das nicht zwischen Kraft und Impuls unterscheidet. Auf mögliche Ursachen für diese Verwechslungen, die an der grundsätzlichen Darstellung des KPK liegen könnten, wurde bereits unter 5.3.3.1 eingegangen.

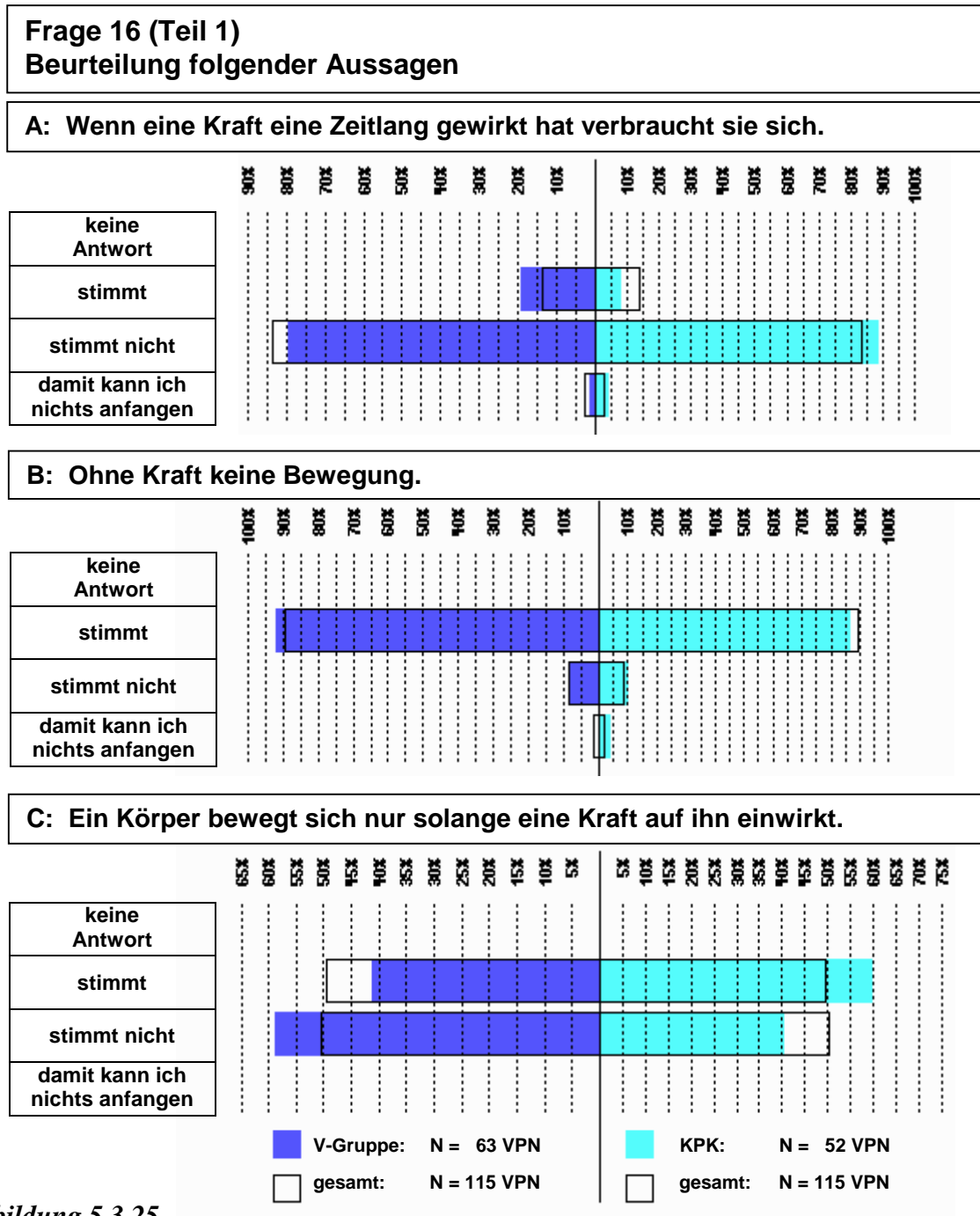


Abbildung 5.3.25

Vergleich der Antworten der Karlsruher Schüler (KPK) mit denen traditionell unterrichteter Schüler (V-Gruppe) auf Frage 16 (Teil 1).



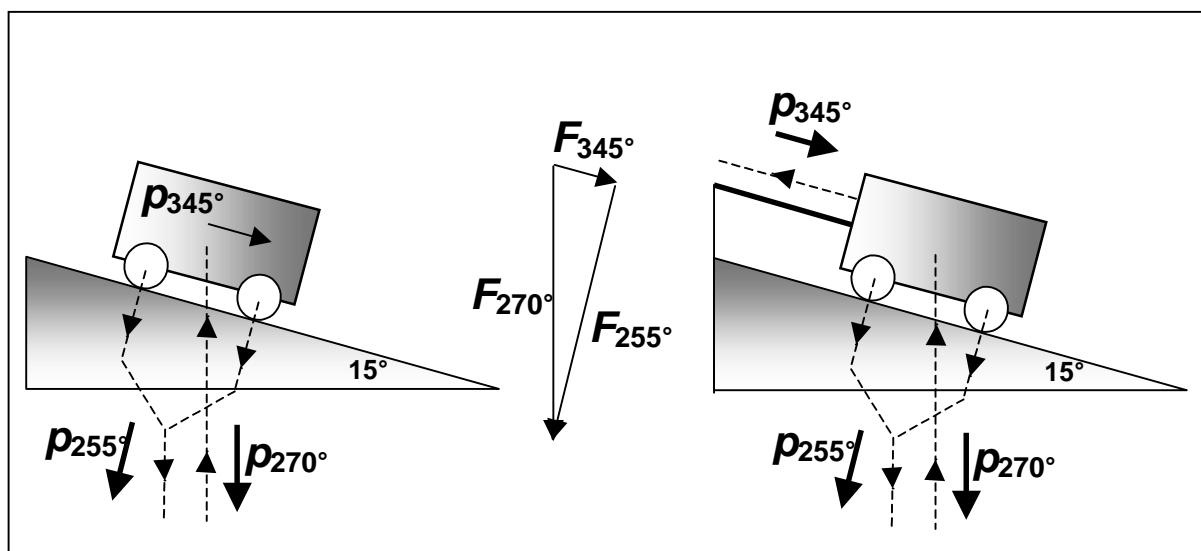
### 5.3.4 Zusammenfassung, Kritik und Alternativen

Die wenigen Items des Fragebogens können natürlich keinen Gesamtüberblick über die Mechanikkenntnisse der beiden Teilstichproben geben. Insgesamt zeigten sich, was die korrekten Lösungen im Bereich Dynamik angeht, keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden. Aus den ähnlichen Ergebnissen, die beide Teilstichproben im nonverbalen Teil der Befragung erzielten, folgt, dass durch den alternativen Mechanikunterricht des KPK keine messbare, höhere Voraussagekompetenz in den dargestellten Situationen erreicht wurde. Dies ist insofern erstaunlich, da bei der Einführung neuer Unterrichtskonzepte, allein durch die höhere Motivation der beteiligten Lehrer im allgemeinen ein besserer Unterrichtserfolg zu erwarten ist. Im formalen- bzw. sprachlichen Teil der Befragung zeigten sich bei einzelnen Items signifikante Unterschiede bei bestimmten formal falschen Lösungsalternativen sowie bei den freiformulierten Antworten. Zu einem gewissen Teil dürften die Schwierigkeiten der Karlsruher Gruppe mit dem Kraftbegriff auf einer fehlenden begrifflichen Trennung zwischen Kraft und Impuls beruhen. Falls dies primär durch das in der Terminologie des KPK exotische Wort „Kraft“ bedingt ist, wären jedoch keine begrifflichen Schwierigkeiten zu befürchten. Die seltene Nennung der formal korrekten Bezeichnung „Impulsstromstärke“ als Synonym für „Kraft“ scheint dies auf den ersten Blick zu bestätigen. Dennoch sind Zweifel angebracht, ob nicht hinter den Schwierigkeiten mit dem formal leicht zu erlernenden Synonimitätsverhältnis der beiden Bezeichnungen tiefere Unsicherheiten, was die Begriffe Impuls, Impulsstrom und Impulsstromstärke angeht, liegen. Bei der Beurteilung der im Fragebogen dargestellten Situationen aus der Statik schneiden die nach dem KPK unterrichteten Oberstufenschüler deutlich „schlechter“ ab als die Vergleichsgruppe. Das ist zunächst ein weiteres Argument für die bereits als Folge der Haupterhebung aufgestellte These, dass dieses Thema für die Mittelstufe ungeeignet ist. Die Ergebnisse der Karlsruher Schüler zeigen darüber hinaus, dass selbst eine Behandlung der Statik auf Klasse 11-Niveau im Impulsstromkonzept, zumindest was die in Frage 3 betrachtete Situation anbelangt, keine Vorteile bringt.

Zur Systematik des KPK gehört die willkürliche Auszeichnung einer Raumrichtung (z. B. positiver x-Impuls) im Eindimensionalen. Eine konsequente Ausdehnung des Verfahrens auf mehrdimensionale Probleme erlaubt eine zunächst übersichtlich erscheinende Beschreibung von Spannungszuständen in statischen Anordnungen durch Ströme dreier unabhängiger skalarer Impulskomponenten  $p_x$ ,  $p_y$ , und  $p_z$  bei festgehaltenem Koordinatensystem. Dieses Konzept erwies sich offensichtlich für den Unterricht als zu kompliziert und wurde bereits im Schülerband des KPK zugunsten einer Beschreibung mit unendlich vielen, durch ihren Winkel zur x-Achse bezeichneten Impulsen aufgegeben. Bei dynamischen Problemen kann der Lerner an den Bewegungsänderungen eines Gegenstandes, in dem sich der Impuls anhäuft (bzw. vermindert), die Richtung des strömenden Impulses erkennen. Bei statischen Anordnungen müsste er sich an jedem Knoten überlegen, in welche Richtung sich

der Knoten in Bewegung setzt, wenn der entsprechende Impulsleiter gekappt würde. Die Richtung des strömenden Impulses legt im KPK die Richtung des Vektors der Impulsstromstärke (=Kraft) fest [HERR93a]: „*Richtung des (Impulsstromstärke-) Pfeils: Richtung des Impulses der durch die Leitung strömt.*“ Hier dürfte eine wesentliche Ursache für die bei den Karlsruher Schülern häufige Verwechslung von Impuls mit Impulsstromstärke liegen. In dieser Vorzeichenfestlegung steckt jedoch die Systematik des KPK, denn sie erlaubt die Aufteilung von Impulsströmen an Knoten in geschlossenen Impulsstromkreisen (vgl. *Abbildung 5.3.26*).

Darüber hinaus ergibt sich aus ihr eine zur traditionellen „Zerlegung von Kräften“ beim Kräftedreieck analoge formale Beschreibung mit Kraftpfeilen. Z. B. fließt in einen Wagen auf einer um  $15^\circ$  geneigten Ebene von der Erde  $270^\circ$ -Impuls (Gewichtskraft) hinein, dieser teilt sich auf in  $345^\circ$ -Impuls, der aufgrund der Impulsisolation durch die Räder im Wagen verbleibt (Hangabtriebskraft) und  $255^\circ$ -Impuls (Normalkraft) der zur Erde zurück fließt.



**Abbildung 5.3.26**

*In den Wagen fließt  $270^\circ$ -Impuls von der Erde hinein, dieser teilt sich auf in  $345^\circ$ -Impuls, der aufgrund der Impulsisolation durch die Räder im Wagen verbleibt und  $255^\circ$ -Impuls der (irgendwie über durch unter Druckspannung stehende Teile) zur Erde zurück fließt. Wird der Wagen durch ein Seil gegen Wegrollen gesichert, hat man das entsprechende statische Problem. Der  $345^\circ$ -Impuls fließt über das unter Zugspannung stehende Seil ab. Die genauen Wege auf denen der Impuls strömt sind unbekannt. Die eingezeichneten „Impulswege“ und „Impuls Pfeile“ stellen eine, in den mehrdimensionalen Darstellungen des KPK nicht vorkommende, Interpretation der zugehörigen sprachlichen Beschreibung dar, die sich an den einführenden Beispielen orientiert. Die gestrichelt dargestellten Richtungen sollen dabei lediglich die Aufteilung des Impulses andeuten, die kurzen Impuls Pfeile die Richtungen der betrachteten Impuls Komponenten.*

Wird der Wagen durch ein Seil gegen Wegrollen gesichert, hat man das entsprechende statische Problem (vgl. *Abbildung 5.3.26*). Die Wege, die der Impuls dabei nimmt, bleiben i. d. R. unbekannt. Sie kommen bei vektoriellen Betrachtungen in mehreren Dimensionen nur in der Sprache des Schülerbandes vor, werden aber nicht mehr (wie bei den eindimensionalen Beispielen) symbolisch angedeutet. Auch für die strömende Impulskomponente selbst werden bei mehrdimensionalen statischen Beispielen (Laternenproblem) den Schülern keine Pfeilsymbole im Skript angeboten. Nur eine symbolische Darstellung der Impulsstromstärken wird in den Beispielen gezeigt, die den in traditionellen Schulbüchern üblichen Darstellungen vom Kräftedreieck entspricht.

Der Verzicht auf Termini einer Fernwirkungstheorie wie z. B. auf das Wort „Wechselwirkung“ führt m. E. ebenfalls dazu, dass im KPK nicht deutlich genug zwischen Impuls und Impulsänderung pro Zeit getrennt wird. Das wird besonders bei der Einführung der Größe „Impulsstromstärke“ im Schülerband deutlich:

„Wir nennen die Impulsmenge, die durch eine Leitung fließt, dividiert durch die Zeitspanne die Impulsstromstärke. Diese Gleichung lässt sich viel kürzer schreiben, wenn man für die Größen ihre Symbole setzt:  $p$  = Impuls,  $F$  = Impulsstromstärke,  $t$  = Zeit. Wir haben also:

Impulsstromstärke = Impuls / Zeitdauer,  $\mathbf{F} = \mathbf{p}/t$ .“ (Hervorh. im Original) [HERR93a]

Eine der Stärken des KPK, nämlich die Beachtung der sichtbaren Veränderungen von Impulsleitern, in denen Impuls strömt, wird durch den o. g. Verzicht auf entsprechende Symbole bei quantitativen Anwendungen aus der Statik nicht genutzt. Dahinter steht vielleicht die Befürchtung, physikalisch falsche Assoziationen einer strömenden realen „Impulselementarladung“ zu wecken. In der Sprache wird dieses Bild jedoch konsequent verwendet.

Eine Alternative zum KPK wäre eine Darstellung der Statik, die sich an der Beschreibungsweise der Dynamik orientiert und ebenfalls den Impuls als mengenartige Erhaltungsgröße in den Mittelpunkt stellt, jedoch einige Begriffe der Fernwirkungstheorie weiter verwendet.

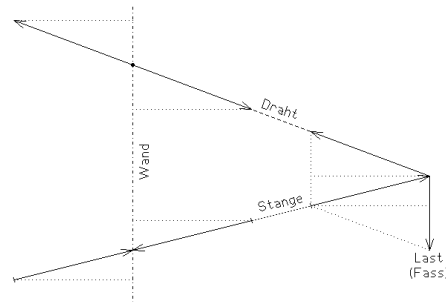
Bei der Betrachtung statischer Anordnungen in einem Modell nach Treitz [TREI97] werden wie im KPK die Zustände der Impulsleiter genauer betrachtet, jedoch nicht unter dem Aspekt eines einzigen geschlossenen Impulsstromkreises. Damit wird zunächst die willkürliche Auszeichnung einer Raumrichtung (z. B. positiver  $x$ -Impuls) überflüssig. Statische Anordnungen werden mittels linienförmigen Impulsleitern (Stangen, Stäbe, Seile und Drähte), die sich verlängern und verkürzen aber nicht biegen sollen, modelliert. Zweidimensionale Körper lassen sich durch Fachwerke aus masselosen „Teleskopfedern“ aufbauen. Die Beschreibung statischer Anordnungen wird damit völlig symmetrisch, und ist, wenn man sich

### 1.3.6.3 (Aufgabe) Das goldene Fass

Über dem Eingang des Wirtshauses "Zum Goldenen Faß" (noch in alter Orthografie) hängt ein entsprechend gefärbtes Fass (das vermutlich leer, aber trotzdem relativ schwer ist) an zwei (sehr leichten) Stangen, die an der Hauswand befestigt sind, die obere kann auch durch eine Kette oder ein Seil ersetzt sein, wie wir sehen werden. Bestimmen Sie aus einer Zeichnung mit Vorgabe der Geometrie und dem Gewicht des Fasses die Kräfte in den Stangen und an den Befestigungen (Lagerkräfte). Zeigen Sie, dass diese Schwerkraft und die Lagerkräfte (natürlich vektoriell) zusammen 0 sind.

#### Lösung

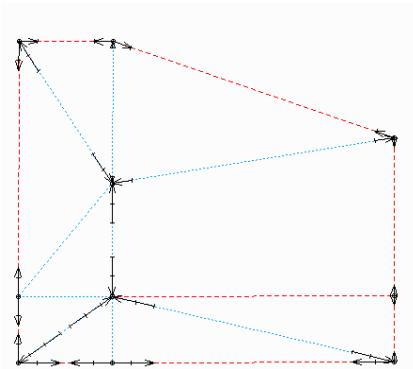
Das Bild zeigt die Kraftpfeile (durchgezogen) an den Enden der (dicht gepunkteten) Stange und des (gestrichelten) Seils. Die weit gepunkteten waagerechten und senkrechten Hilfslinien zeigen zwei Gruppen von jeweils deckungsgleichen Kraftdreiecken. Aus ihnen kann man unmittelbar die Verhältnisse der Kraftbeträge ablesen, sowie die Bedeutung der Lagerkräfte:



Diese müssen vertikal die Schwerkraft ausgleichen, und waagrecht heben sie sich gegenseitig auf. Damit bleibt die ganze Anordnung in Ruhe.

Beachten Sie bitte, dass die Betragsgleichheit der Kräfte an den Enden jeweils einer Stange oder eines Seiles zu den Modelleigenschaften gehört und wegen der gedachten Masselosigkeit aus der Impulserhaltung folgt. Dass in jedem Knoten die Summe der einlaufenden Impulse und damit auch der Kräfte null ist, ist dagegen eine besondere Voraussetzung, die die Statik von der Dynamik unterscheidet.

Die Lagerkräfte bedeuten zunächst, dass entsprechend kräftige Haken und Dübel in der Wand sein müssen, sie fordern aber auch, dass die Wand gegen Umfallen und gegen Einsinken in den Boden gesichert ist.



Wenn man nur das System aus den drei Knotenpunkten und ihren Verbindungen betrachtet, so erscheinen die Schwerkraft und die beiden Lagerkräfte als Impulswanderungen zwischen diesem System und der Außenwelt. Man kann das System durch ein Fachwerk, das die Wand und den Fußboden enthält, erweitern und dabei die Schwerkraft durch ein gespanntes (d.h. „zu kurzes“ Seil vom Fass nach unten ersetzen. Der Computer findet dann die Kraftpfeile mit dem in 1.3.6.6 skizzierten Programm.

Abbildung 5.3.27

Beispielaufgabe mit Lösung aus [TREI97]

die unter Zug- bzw. Druckspannung stehenden Teile als anziehende- bzw. abstoßende Wechselwirkung vorstellt, analog zur Dynamik.

„An den Knoten stellen wir uns beliebige (!) Punktmassen vor, die Federn geben stets an beide Enden entgegengesetzt gleiche Impulsänderungen ab, die bei Druck nach außen und bei Zug nach innen gerichtet sind, also parallel zur Linie gerichtet sind, die durch diese Endpunkte geht.

Auch die Schwerkraft zwischen zwei Punktmassen im Planetensystem oder die Coulombkraft können wir uns so im Modell vorstellen.“ [TREI97]

Im Gegensatz zum KPK wird anhand der Kraftpfeile an den Knoten in statischen Anordnungen deutlich, dass in jedem Knoten die Summe der einlaufenden Impulse und damit auch der Kräfte null ist. Die Beispielaufgabe aus [TREI97] in *Abbildung 5.3.27* macht das Verfahren deutlich.

Mit dem Verzicht auf geschlossene Impulsstromkreise wird das für den KPK wesentliche Konzept des Impulses als Energieträger bei dieser Darstellung allerdings aufgegeben. Für die Betrachtung statischer Gleichgewichte spielt das zwar keine große Rolle - hier fließen auch nach Karlsruher Sprechweise die Impulsströme widerstandsfrei. Aber für m. E. wichtige Teile der klassischen Mechanik, insbesondere die Einführung der Dynamik auf dem Niveau der Sekundarstufe I, bietet die in der Struktur des KPK liegende begriffliche Trennung zwischen Energie und Impulsstromstärke sicherlich große Vorteile. Beide Verfahren vermeiden jedoch, da sie von Anfang an den Impuls in den Mittelpunkt stellen, die begriffliche Unterscheidung der 4 beim einfachsten statischen Problem auftretenden Kräfte. Dieses Problem

„... ist so kompliziert, dass es ein Durchschnittsschüler sicher nicht verstehen kann. Tatsächlich haben noch Physikstudenten nach dem Vordiplom Schwierigkeiten, die vier Kräfte auseinanderzuhalten. Die Schule macht trotzdem den verzweifelten Versuch, den Newtonschen Kraftbegriff in der Mittelstufe einzuführen.“ [HERR97c]

Dennoch sollte, insbesondere im Interesse von Schülern, die nach dem Physikunterricht z. B. in einer gewerblichen Ausbildung mit traditionellen Darstellungen der Mechanik in Berührung kommen, im KPK etwas ausführlicher auf den Kraftbegriff eingegangen werden. Konkret sollten im Schülerband die Begriffe Impuls und Impulsstromstärke deutlicher voneinander abgegrenzt werden. Auch wenn dazu eventuell Bezeichnungen wie „Wechselwirkung“ und „(zeitliche) Impulsänderung“, die nicht so recht zur sauberen Formulierung einer Nahwirkungstheorie passen, günstig sind.