

Kapitel 4

Die Untersuchung

*Es gibt eine Theorie, die besagt,
wenn jemals irgendwer genau rausfindet,
wozu das Universum da ist und warum es da ist,
dann verschwindet es auf der Stelle
und wird durch etwas noch Bizzarreres
und Unbegreifliches ersetzt.*

*Es gibt eine andere Theorie, nach der das schon passiert ist.
(D. Adams; Das Restaurant am Ende des Universums)*

Das Thema Quantenphysik in der Sekundarstufe II ist – wie im Kapitel 2: “Quantenphysik-Unterricht und Epistemologie” bereits erwähnt wurde – seit langem Bestandteil der fachdidaktischen Literatur. Es ist jedoch immer noch ein aktuelles Arbeitsfeld, in dem Herausforderungen zu bewältigen sind. Es sind Untersuchungen sowohl zur Entwicklung von Unterrichtskonzeptionen, die die Quantenphysik auf dem für die Schule zumutbaren kognitiven Niveau vermitteln, als auch zur Entwicklung von Verfahren und Instrumenten, um die Schülervorstellungen über die Quantenwelt zu erheben, erforderlich.

Im Kapitel 2 haben wir für die Betrachtung der Quantenphysik in der Sekundarstufe II aus einer epistemologischen Perspektive plädiert und die Leitlinien einer aus dieser Perspektive begründeten Unterrichtssequenz vorgestellt. Der Schwerpunkt des Unterrichts liegt in der Darstellung einer Problemsituation – der Ausbreitung des Lichts im Mach-Zehnder-Interferometer –, mit deren Hilfe die Schüler mit unterschiedlichen Modellen für das Licht: Teilchen, Wellen und Photonen konfrontiert werden sollen, um das seltsame Verhalten von Photonen im Hinblick auf die Teilchen- bzw. Wellenerscheinung zu begreifen.

Das Anliegen dieses Kapitels ist es, den Leitfaden und einige Ergebnisse einer Un-

tersuchung zur Erforschung der Schülervorstellungen über das Verhalten von Photonen im Hinblick auf ihre Vorstellungen über das Teilchenbild und das Wellenbild zu präsentieren. Die Untersuchung versteht sich jedoch nicht als eine Evaluation der Unterrichtskonzeption, sondern eher als eine explorative Studie, in der versucht wird, die Schülervorstellungen über Photonen auf der Grundlage einer begrenzten Anzahl von Untersuchungskategorien darzustellen.

4.1 Fragestellungen und Ziele der Untersuchung

Um die Schülervorstellungen über Photonen aus einer phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Perspektive zu erforschen, haben wir uns an dem von Bachelard geprägten Konzept des “epistemologischen Profils” orientiert. In seinem Buch “Die Philosophie des Nein” [Bachelard 1980] schreibt Bachelard über den Pluralismus philosophischer Kultur in der wissenschaftlichen Gemeinschaft und entwickelt den Begriff epistemologisches Profil, um

mit Hilfe eines solchen Profils die effektive Wirkung unterschiedlicher Philosophien im Wissenswerk messen zu können. [Bachelard 1980], S. X

Bachelard meint dennoch selbst, dass dieses Profil

eine polemische Skala ist, um die mannigfaltigen Facetten der Philosophie der Wissenschaft messen zu können. [Bachelard 1980], S. X

Trotz der Bedenklichkeit solcher Skala stellt Bachelard am Beispiel des Begriffs “Masse” sein eigenes Profil dar (mehr über das Thema epistemologisches Profil im Kapitel 2 dieser Arbeit).

Das Konzept des epistemologischen Profils wurde im Bereich Chemie- und Physikdidaktik bereits von einigen Autoren verarbeitet, darunter von Mortimer [Mortimer 1995] und Pinto & Zanetic [Pinto et al. 1999]. Pinto & Zanetic haben beispielsweise mit Hilfe des Begriffes epistemologisches Profil eine empirische Untersuchung durchgeführt, um die philosophischen Tendenzen in den Schülervorstellungen über das Thema Licht zu erheben. Mortimer hat die Idee des epistemologischen Profils in der Chemiedidaktik verwendet, um die Schülervorstellungen über den Begriff Atom zu erforschen, wobei er den Begriff “konzeptuelles Profil” in Anlehnung an den von Bachelard geprägten Begriff “epistemologisches Profil” eingeführt hat.

In der vorliegenden explorativen Untersuchung werden wir den Begriff des konzeptuellen Profils von Mortimer bearbeiten. Das konzeptuelle Profil der Schüler wird im

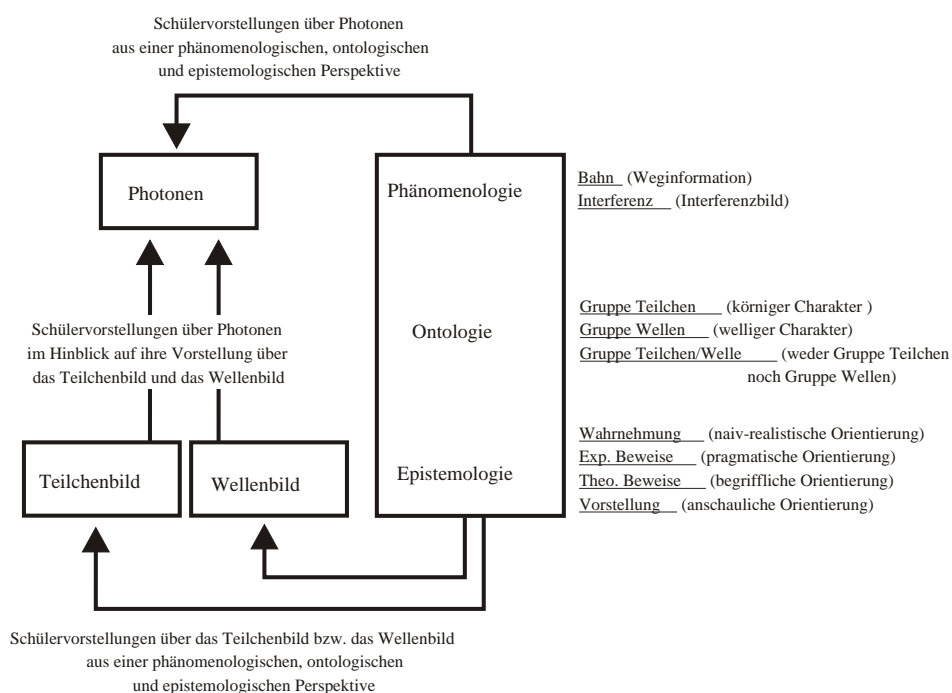


Abbildung 4.1: Die Leistung des konzeptuellen Profils der Schüler

Rahmen unserer Arbeit durch die Erhebung von Schülervorstellungen über das Teilchenbild, das Wellenbild und Photonen bezüglich der Phänomene Bahn (Weginformation) und Interferenz sowie über ontologische bzw. epistemologische Positionen der Schüler bezüglich dieser Themen erfasst. Das konzeptuelle Profil der Schüler stellt auf diese Weise eine "Topografie" der Schülervorstellungen dar, in der ihre Vorstellungen über Photonen in unterschiedlichen Dimensionen beobachtet werden können (s. Abb. 4.1, S.87): Einerseits werden die Schülervorstellungen über Photonen aus der Perspektive phänomenologischer, ontologischer und epistemologischer Untersuchungskategorien berücksichtigt. Andererseits werden die Vorstellungen der Schüler über Photonen aus der Sicht ihrer Vorstellungen über das Teilchenbild und Wellenbild, die ihrerseits auch bezüglich der phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Kategorien erhoben werden, betrachtet.

Die allgemeinen Zielsetzungen der Untersuchung umfassen die folgenden Fragestellungen:

- Zum einen ist es die Frage nach der Struktur der Schülervorstellungen über Photonen: Lässt sich bei den Schülern ein konzeptuelles Profil erkennen?

- Zum anderen ist es die Frage nach der Auswirkung des Unterrichts auf die Schülervorstellungen: Lassen sich Veränderungen im Profil der Schüler aufgrund des Unterrichts feststellen?

4.2 Methodisches Vorgehen

Die Untersuchung besteht aus zwei Teil-Untersuchungen, in denen das Konstrukt des epistemologischen Profils eingesetzt wird.

In der ersten Teil-Untersuchung wird das konzeptuelle Profil der Schüler mit Hilfe eines halboffenen Fragebogens erhoben. In diesem Teil der Untersuchung ist vor allem beabsichtigt, das konzeptuelle Profil der Schüler zu erheben und Strukturen im Profil der Schüler zu identifizieren. Die Schüleraussagen im Fragebogen werden in einem konzeptuellen Raum (s. Abschnitt 4.3.2.1) dargestellt und mit Hilfe von entwickelten Untersuchungskategorien interpretiert und klassifiziert. In dieser Teil-Untersuchung wird eine deskriptive Analyse der Schülervorstellungen durchgeführt.

In der zweiten Teil-Untersuchung wird das konzeptuelle Profil der Schüler ebenfalls mit Hilfe eines Fragebogens erhoben. Der Schwerpunkt der zweiten Teil-Untersuchung liegt darin, die Auswirkung des Unterrichts auf das konzeptuelle Profil der Schüler zu erforschen. Die Schülerantworten werden in der zweiten Teil-Untersuchung ebenfalls im Hinblick auf das entwickelte Untersuchungskategoriensystem ausgewertet und darüber hinaus mit Hilfe von nicht-parametrischen Verfahren der Inferenzstatistik analysiert.

Die Fragebogen werden sowohl in der ersten Teil-Untersuchung als auch in der zweiten Teil-Untersuchung in einem Messwiederholungsdesign – Vortest (VT) und Nachtest (NT) – eingesetzt.

4.2.1 Das Kategoriensystem

Um das konzeptuelle Profil der Schüler zu erfassen, wurde eine begrenzte Zahl von Untersuchungskategorien entwickelt. Die Untersuchungskategorien bilden ein theoriegeleitetes Kategoriensystem (s. Abbildung 4.2, S. 91), das sowohl zur Entwicklung als auch zur Auswertung der Fragebogen dient. In der Darstellung des Kategoriensystems erkennt man drei thematische Untersuchungsfelder: Teilchenbild, Wellenbild und Photonen; vier Kategorien: Objekte, Phänomene, Ontologische Aussagen und Epistemologische Aussagen und die den Kategorien entsprechenden Merkmale: Teilchen, Wellen, Photonen, Bahn, Interferenz, Gruppe Teilchen, Gruppe Wellen usw.

Die Möglichkeit einer Ort-Messung an einem (lokalisierbaren) Objekt kennzeichnet

das Teilchenbild. Die Interferenzerscheinung durch die Überlagerung von Wellen kennzeichnet das Wellenbild. In der klassischen Physik schließt das Teilchenbild die Wellenerscheinung aus, denn Teilchen beziehen sich auf lokalisierte Wechselwirkungen und Wellen beziehen sich hingegen auf nicht lokalisierte Wechselwirkungen.

Im Mach-Zehnder-Interferometer zeigen die Photonen einerseits eine lokalisierte Wechselwirkung (Welcher-Weg-Information), die typisch für Teilchen ist, und andererseits eine nicht lokalisierte Wechselwirkung, die Interferenzerscheinung ermöglicht und typisch für Wellen ist. Jedoch solange die Information darüber, welcher Weg das Photon durch das Interferometer nimmt, vorhanden ist, kann das Interferenzbild nicht wohldefiniert sein. Dies ist ein Beispiel für das Problem der Komplementarität Welle-Teilchen in der Quantenphysik.

Bei der Beobachtung der Schüleraussagen über Photonen im Hinblick auf ihre Aussagen über das Verhalten von Teilchen und Wellen wollen wir erfahren, wie die Schüler das Problem, das in der Komplementarität Welle-Teilchen enthalten ist, wahrnehmen. In anderen Worten: Wir wollen wissen, ob die Schüler in einer vordefinierten Situation Photonen bevorzugt mit Teilchen-Vorstellungen oder bevorzugt mit Wellen-Vorstellungen assoziieren. Daher entsteht die Differenzierung der thematischen Untersuchungsfelder: Teilchenbild, Wellenbild und Photonen und die Differenzierung der Kategorie Objekte in den Merkmalen: Teilchen, Wellen und Photonen.

Aus einer phänomenologischen Perspektive werden im Unterrichtskonzept Teilchen durch eine lokalisierte Wechselwirkung (Bahnbeschreibung) und Wellen durch eine nicht lokalisierte Wechselwirkung (Interferenzerscheinung) gekennzeichnet. Daher wird die Kategorie Phänomene mit Hilfe der Merkmale Bahn und Interferenz unterschieden.

Zu lokalisierbaren Entitäten (Teilchen) gehören Eigenschaften wie beispielsweise ein Ort, der zu jedem Zeitpunkt genau bestimmt werden kann. Zur Beschreibung von Schwingungsvorgängen (Wellen) gehören hingegen andere Eigenschaften, wie zum Beispiel "kein bestimmter Ort". Solche Eigenschaften, die die Teilchen- bzw. die Wellenbeschreibung charakterisieren können, werden innerhalb der Gruppen: Teilchen, Teilchen/Wellen und Wellen als Ontologische Aussagen zusammengefasst.

Eigenschaften der Erkenntnisgewinnung eines Objekts bzw. eines Phänomens wie beispielsweise: Erkenntnis durch "Experimentelle Beweise" oder Erkenntnis durch "Theoretische Beweise" sind Merkmale, die zur Kategorie "Epistemologische Aussagen" gehören.

Die Kategorien bzw. Merkmale bilden ein strukturiertes Kategoriensystem, mit dessen Hilfe sowohl die Untersuchung der Schülervorstellungen über die einzelnen Objekte Teilchen, Wellen und Photonen (innerhalb jedes thematischen Untersuchungsfeldes) auf einer phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Perspektive als auch die Charakterisierung der Schülervorstellungen über Photonen bezüglich ihrer Vorstel-

lungen über das Teilchenbild und das Wellenbild möglich werden. Auf diese Weise wird eine Gleichwertigkeit zwischen den Befragungen in den unterschiedlichen thematischen Feldern gewährleistet und daher der Vergleich zwischen den Schülerantworten auf den unterschiedlichen Feldern ermöglicht, was auch für die Validierung der Interpretationen der Schülervorstellungen im thematischen Feld Photonen spricht.

Die Untersuchungskategorien und die Merkmale werden im Folgenden noch einmal im Überblick zusammengefasst:

- Zur Untersuchungskategorie “Objekte” gehören die Merkmale “Teilchen”, “Wellen” und “Photonen”.
- Zur Untersuchungskategorie “Phänomene” gehören die Merkmale “Bahn” und “Interferenz”.
- Zur Untersuchungskategorie “Ontologische Aussagen” gehören die Merkmale “Gruppe Teilchen”, “Gruppe Wellen” und “Gruppe Teilchen/Wellen”.
- Zur Untersuchungskategorie “Epistemologische Aussagen” gehören die Merkmale “Wahrnehmung”, “Experimentelle Beweise”, “Theoretische Beweise” und “Vorstellungen”.

4.2.2 Verlauf der Untersuchung

In der Abbildung 4.3, S. 92 ist der Zeitverlauf der gesamten Untersuchung im Überblick präsentiert.

Die Durchführung der ersten Teil-Untersuchung (Unterrichtsreihe und Tests) erfolgte zwischen Februar und März 2000 in einem Leistungskurs eines Berliner Gymnasiums mit insgesamt 18 Schülerinnen und Schülern. Für die Analyse werden 9 Schüler und Schülerinnen, die in den meisten Unterrichtsstunden anwesend waren und sowohl am Vor- als auch am Nachtest teilgenommen haben, ausgewählt. Dieser Stichprobenumfang ermöglicht eine detaillierte Analyse der Schüleraussagen im Fragebogen.

Die Durchführung der zweiten Teil-Untersuchung erfolgte zwischen Januar und April 2001 in zwei anderen Berliner Gymnasien in zwei Leistungskursen mit insgesamt 28 Schülerinnen und Schülern. Mit diesem Stichprobenumfang wird eine quantitative Analyse der Schülerantworten unter Verwendung von nicht-parametrischen Verfahren durchgeführt.

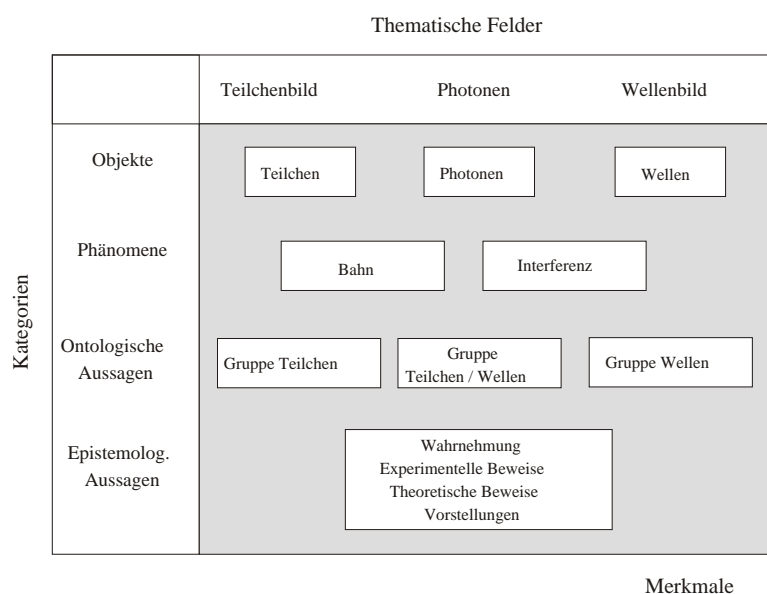


Abbildung 4.2: Das Kategoriensystem

4.3 Die erste Teil-Untersuchung

In der Tabelle 4.1, S. 93 sind der Verlauf der Unterrichtssequenz und die entsprechenden Unterrichtsfelder bzw. Unterrichtsschwerpunkte sowie die Platzierung der Tests für die erste Teil-Untersuchung angegeben.

Die Lehrer wurden in ausführlichen Gesprächen vor der gesamten Unterrichtseinheit und vor jeder Unterrichtsstunde über die Intentionen der Unterrichtskonzeption und die jeweils angemessenen Unterrichtsmethoden informiert. Außerdem haben sie für jede Unterrichtsstunde Lehrerhandreichungen (s. Anhang A: Lehrerhandreichung) bekommen, die als Vorschlag zur Unterrichtsplanung dienten. Die Unterrichtsmaterialien, Informationsblätter, Arbeitsblätter und Aufgaben, die zum Teil auch in Gesprächen mit den Lehrern entwickelt wurden, sind von den Lehrern im Unterricht oft verwendet worden.

4.3.1 Der halboffene Fragebogen

Das Hauptinstrument zur Erfassung des konzeptuellen Profils der Schüler ist ein halboffener Fragebogen, der am Anfang der Unterrichtssequenz (Vortest: VT) und nach der

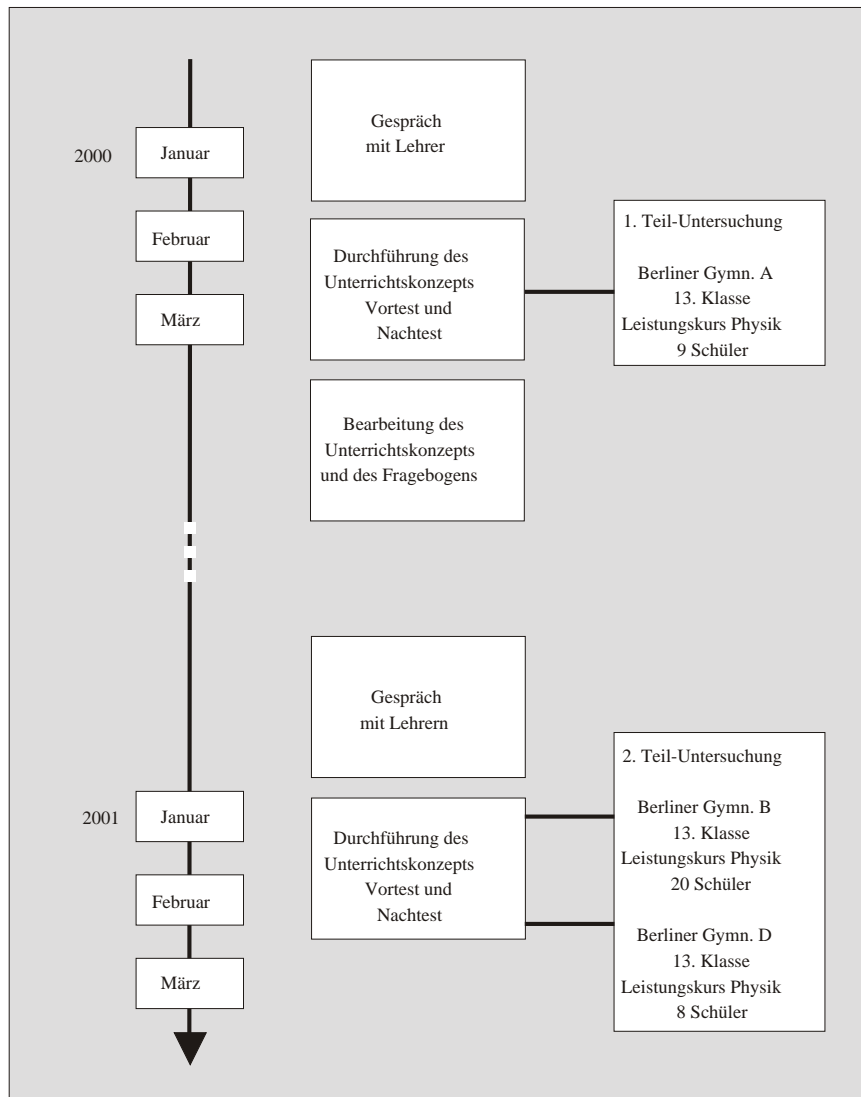


Abbildung 4.3: Das Untersuchungsdesign

Erhebungen	Unterrichtsabschnitte	Datum	Schwerpunkt der Unterrichtssequenz
	Wiederholungsphase	12.02.00	Der Lichtelektrische Effekt Wellenoptik
Vortest (VT) (9 Schüler)		24.02.00	Bearbeitung des Fragebogens
	1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang	29.02.00	Experimentelle Feinabstimmung MZ-Interferometer: Aufbau
	2. Unterrichtsfeld: Zielgerichtete Beobachtung	02.03.00	MZ-Interferometer: Justierung
	3. Unterrichtsfeld: Idealisierung	07.03.00	MZ-Interferometer: Idealisierung Wellenmodell des Lichts
	4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion	11.03.00	MZ-Interferometer: mit Photonen Interpretationen des Experimentes
Nachtest (NT) (9 Schüler)		16.03.00	Bearbeitung des Fragebogens

Tabelle 4.1: *Die erste Teil-Untersuchung: Unterrichtssequenz und Erhebungen*

Durchführung der Unterrichtsreihe (Nachtest: NT) eingesetzt wurde. Der halboffene Fragebogen ist im Anhang B: Fragebogen – 1. Teil-Untersuchung wiedergegeben.

Die Aufgabe für die Schüler im Fragebogen besteht darin, aus vorgegebenen Satz-elementen ganze Sätze zu bilden, die für sie wahr sind. Drei Satzelemente sind in drei Feldern des Fragebogens vorformuliert und beziehen sich jeweils auf eine der Untersuchungskategorien des Kategoriensystems: Objekte, Phänomene und Ontologische Aussagen. Hinzu kommt in einem anderen Feld des Fragebogens eine Gruppe von Sätzen mit epistemologischen Aussagen, aus denen die Schüler die für den zusammengeschrriebenen Satz passende Satzergänzung auszuwählen haben. Jeder ganze Satz besteht also aus drei Satzelementen und einer Satzergänzung mit einer epistemologischen Aussage.

Die folgende Tabelle beschreibt die Felder des Fragebogens im Hinblick auf die Satz-elemente und die Untersuchungskategorien:

Felder im Fragebogen (s. Anhang B: Fragebogen – 1. Teil-Untersuchung)	Untersuchungskategorien
1. Feld (Seite 1 – Spalte 1: Satzanfang)	→ Objekte
2. Feld (Seite 2 – Spalte 2: Ergänzung)	→ Phänomene
3. Feld (Seite 2 – Spalte 3: Begründung-O)	→ Ontologische Aussagen
4. Feld (Seite 3 – Spalte 2: Begründung-E)	→ Epistemologische Aussagen

Die vier Felder des Fragebogens enthalten jeweils mehrere Satzelemente, aus denen die Schüler passende Aussagen zum Aufbau vollständiger Aussagesätze auswählen sollen.

Im ersten Feld des Fragebogens sind beispielsweise drei Satzelemente angeboten (s. Anhang B: Fragebogen – 1. Teil-Untersuchung, Seite 1, Spalte 1, Satzanfang). Diese Satzelemente beziehen sich auf die Objekte: Blatt (lokalisierbares Objekt), Licht (Wellenmodell) und Photonen. Am Beispiel des Verhaltens eines Blattes beim Fallen und der Lichtausbreitung bei normaler bzw. reduzierter Intensität werden die thematischen Felder Teilchenbild, Wellenbild und Photonen im Fragebogen erfasst.

Die Schüler werden gebeten, mindestens einen ganzen Satz für jedes Objekt – Blatt, Licht und Photon – zu schreiben. Dazu müssen sie ihre Sätze mit einem Satzelement des ersten Feldes (entsprechend der Untersuchungskategorie Objekte) beginnen, dann müssen sie ein für sie angemessenes Satzelement aus dem zweiten Feld entnehmen (entsprechend der Untersuchungskategorie Phänomene), ein Satzelement aus dem dritten Feld (entsprechend der Untersuchungskategorie Ontologische Aussagen) und zum Schluss eine Satzergänzung aus dem vierten Feld (entsprechend der Kategorie Epistemologische Aussagen) auswählen.

Im zweiten Feld des Fragebogens werden den Schülern vier Satzelemente angeboten. Die im Fragebogen angebotenen Satzelemente beziehen sich auf die Merkmale: Bahn und Interferenz.

Das dritte Feld des Fragebogens besteht aus fünfzehn Satzelementen, die den Schülern für den dritten Teil eines Satzes zur Verfügung stehen. Die Satzelemente innerhalb dieses Feldes beziehen sich auf allgemeine Eigenschaften des Teilchen- bzw. des Wellenbildes. Die Satzelemente 1 bis 4 entsprechen der Teilchenbeschreibung und sind deswegen in einer Gruppe (Gruppe Teilchen) zusammengefasst. Die Satzelemente 5 bis 8 beziehen sich auf die Wellenbeschreibung und sind innerhalb einer anderen Gruppe (Gruppe Wellen) gruppiert. Die Satzelemente 9 bis 15 bilden eine dritte Gruppe (Gruppe Teilchen/Wellen).

Das vierte Feld des Fragebogens umfasst achtzehn Sätze, die sich auf allgemeine Aussagen über die Erkenntnisgewinnung bei Objekten und Phänomenen beziehen. Die Aussagen, aus denen dieses Feldes besteht, werden in vier Gruppen zusammengefasst: Die Aussagen 1 bis 10 bilden die Gruppe Wahrnehmung, die Aussagen 11 und 12 bilden die Gruppe Experimentelle Beweise, die Aussagen 13 und 14 bilden die Gruppe Theoretische Beweise und die Aussagen 15 bis 18 bilden die Gruppe Vorstellung.

Da für den Aufbau jedes Satzes jeweils ein Satzelement des ersten, des zweiten, des dritten und des vierten Feldes des Fragebogens verwendet wird, enthält jeder Satz die folgende Struktur:

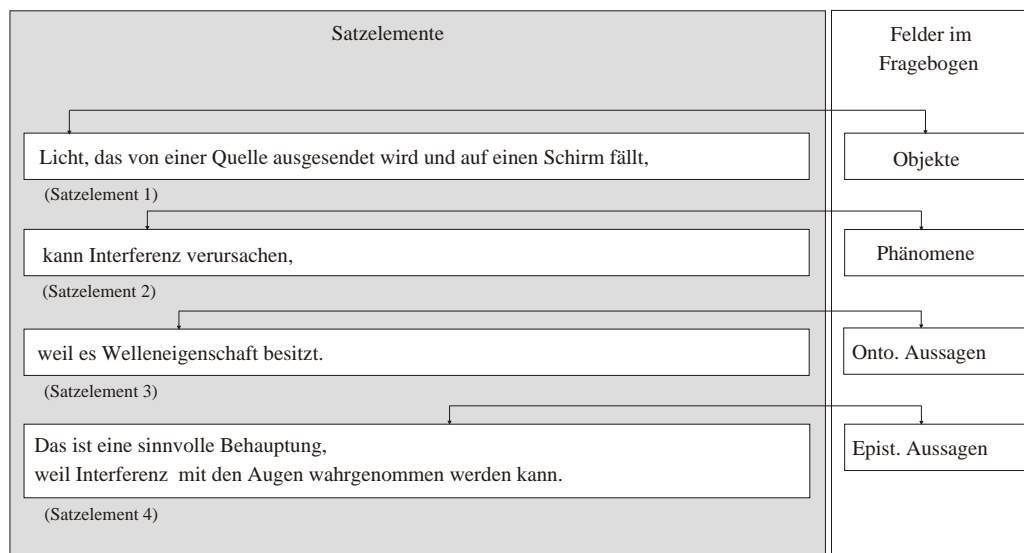


Abbildung 4.4: Der Aufbau eines Satzes am Beispiel des Objektes "Licht"

Satzstruktur:	Objekte \mapsto	Phänomene \mapsto	Ont. Aussagen \mapsto	Epist. Aussagen
im Fragebogen:	Anfang (1. Feld)	Ergänzung (2. Feld)	Begründung-O (3. Feld)	Begründung-E (4. Feld)
Satzelemente: (entsprechend Kategorien)	Blatt Licht Photon	Bahn Interferenz	Gruppe Teilchen Gruppe Wellen G. Teilchen/Wellen	Wahrnehmung Exp. Beweise Theo. Beweise Vorstellung

Am Beispiel der für das Licht im Fragebogen vorgelegten Problemsituation ist in der Abbildung 4.4, S. 95 ein ganzer Satz, der von einem Schüler geschrieben wurde, vorgestellt. Am Beispiel dieses Satzes lässt sich die Struktur: Objekte, Phänomene, Ontologische Aussagen und Epistemologische Aussagen wiedererkennen.

Die Verbindung von Satzelementen entsprechend den Merkmalen: Licht, Interferenz und Gruppe Wellen ist positiv einzuschätzen, denn diese Verknüpfung stimmt mit der Beschreibung des Verhalten des Lichts im Wellenbild überein.

4.3.2 Analyse der Schüleraussagen im Fragebogen

Um das konzeptuelle Profil der Schüler zu skizzieren, werden die Sätze von neun Schülern ausgewertet. Da jeder Schüler jeweils im Vortest und im Nachtest drei komplette Sätze (einen für das Objekt Blatt, einen für das Objekt Licht und einen für das Objekt Photonen) geschrieben hat, haben wir für die Analyse insgesamt 54 Sätze – 27 Sätze aus dem Vortest (VT) und 27 Sätze aus dem Nachtest (NT) – in Betracht gezogen.

4.3.2.1 Der konzeptuelle Raum

Um Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Satzelementen zu gewinnen, stellen wir die ganzen Sätze aller Schüler als Punkte in einem dreidimensionalen Raumdiagramm dar, wie es in der Abbildung 4.5, S. 97 am Beispiel eines Satzes zu sehen ist.

Das Raumdiagramm erinnert in der Form an ein “kartesisches” Koordinatensystem mit drei Koordinatenachsen. In der Regel werden die Koordinatenachsen eines Koordinatensystems als x-, y- und z-Achse bezeichnet und ein beliebiger Punkt P in einem solchen Koordinatensystem als $P(x,y,z)$ dargestellt. Im Gegensatz zum kartesischen Koordinatensystem lässt sich jedoch längs der Achsen des in der Abbildung 4.5 dargestellten Raumdiagramms keine Längeneinheit festlegen. Auf die Achsen Phänomenologie, Ontologie und Epistemologie des Raumdiagramms werden die Satzelemente, wie sie in den entsprechenden Feldern Phänomene, Ontologische- und Epistemologische Aussagen im Fragebogen erschienen, eingeordnet. Längs der Achsen des Diagramms sind also Aussagesätze in Form einer nominalen Skala aufgetragen. Auf diese Weise lässt sich ein beliebiger Satz im Raumdiagramm als ein Punkt P, dessen “Koordinaten” P (Phänomenologie, Ontologie, Epistemologie) sind, darstellen. Da das Raumdiagramm zur Darstellung des konzeptuellen Profils der Schüler dient, wird es als “konzeptueller Raum” bezeichnet.

Der Punkt, der im konzeptuellen Raum in der Abbildung 4.5, S. 97 dargestellt ist, entspricht dem Satz, der im Beispiel in der Abbildung 4.4, S. 95 vorgestellt wurde. In gleicher Weise wie für den Satz des Beispiels in der Abbildung 4.5 lassen sich alle Sätze der Schüler im konzeptuellen Raum darstellen.

Darstellung der Sätze der Schüler im konzeptuellen Raum

Die von den Schülern konstruierten Sätze werden im konzeptuellen Raum in der Abbildung 4.6, S. 98 (Vortest) und in der Abbildung 4.7, S. 99 (Nachtest) dargestellt. Mit Hilfe der Darstellung der Sätze im konzeptuellen Raum lassen sich generelle Informationen über das konzeptuelle Profil der Schüler gewinnen. Beispielsweise:

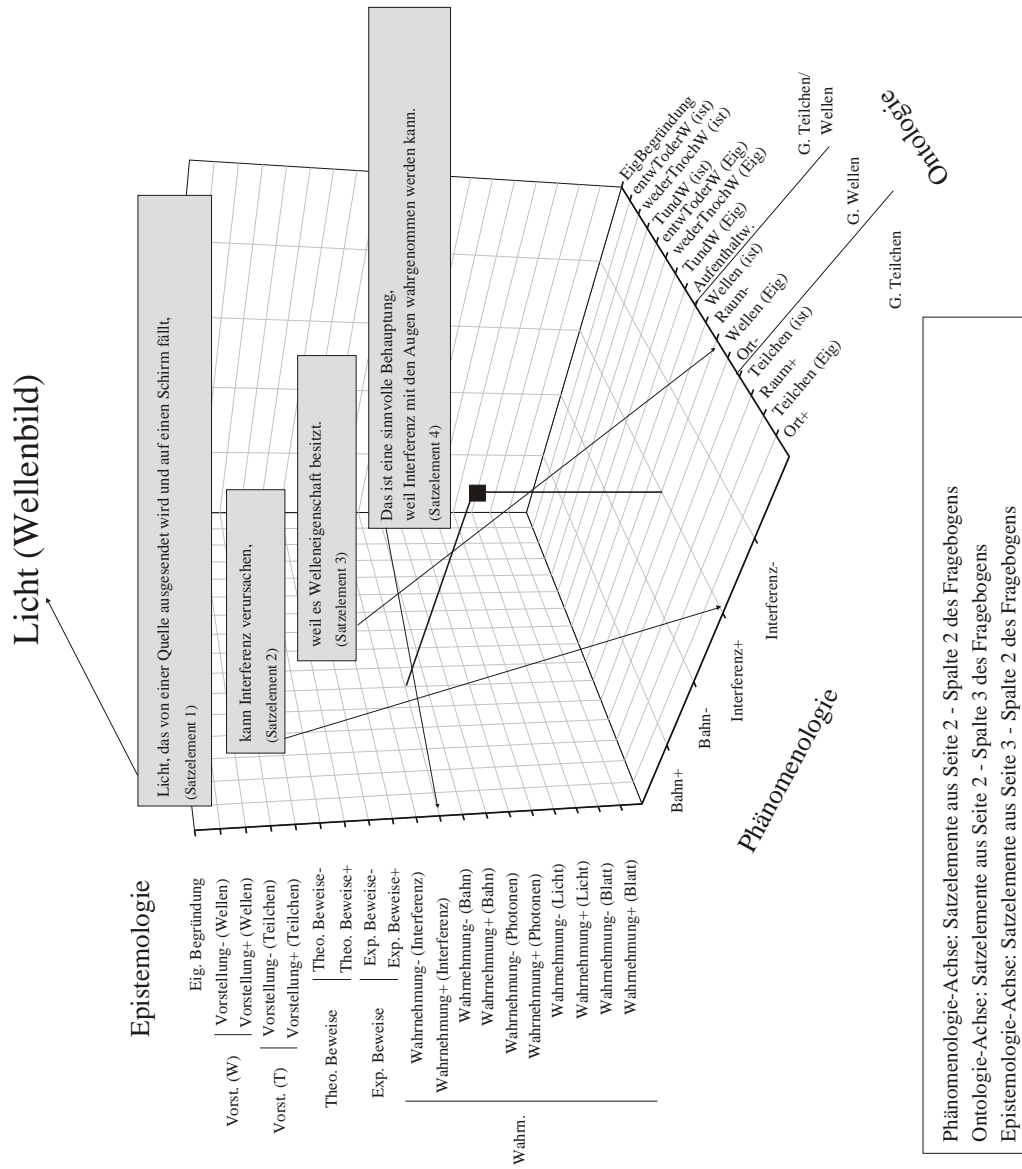


Abbildung 4.5: Der konzeptuelle Raum am Beispiel eines Satzes für das Objekt "Licht"

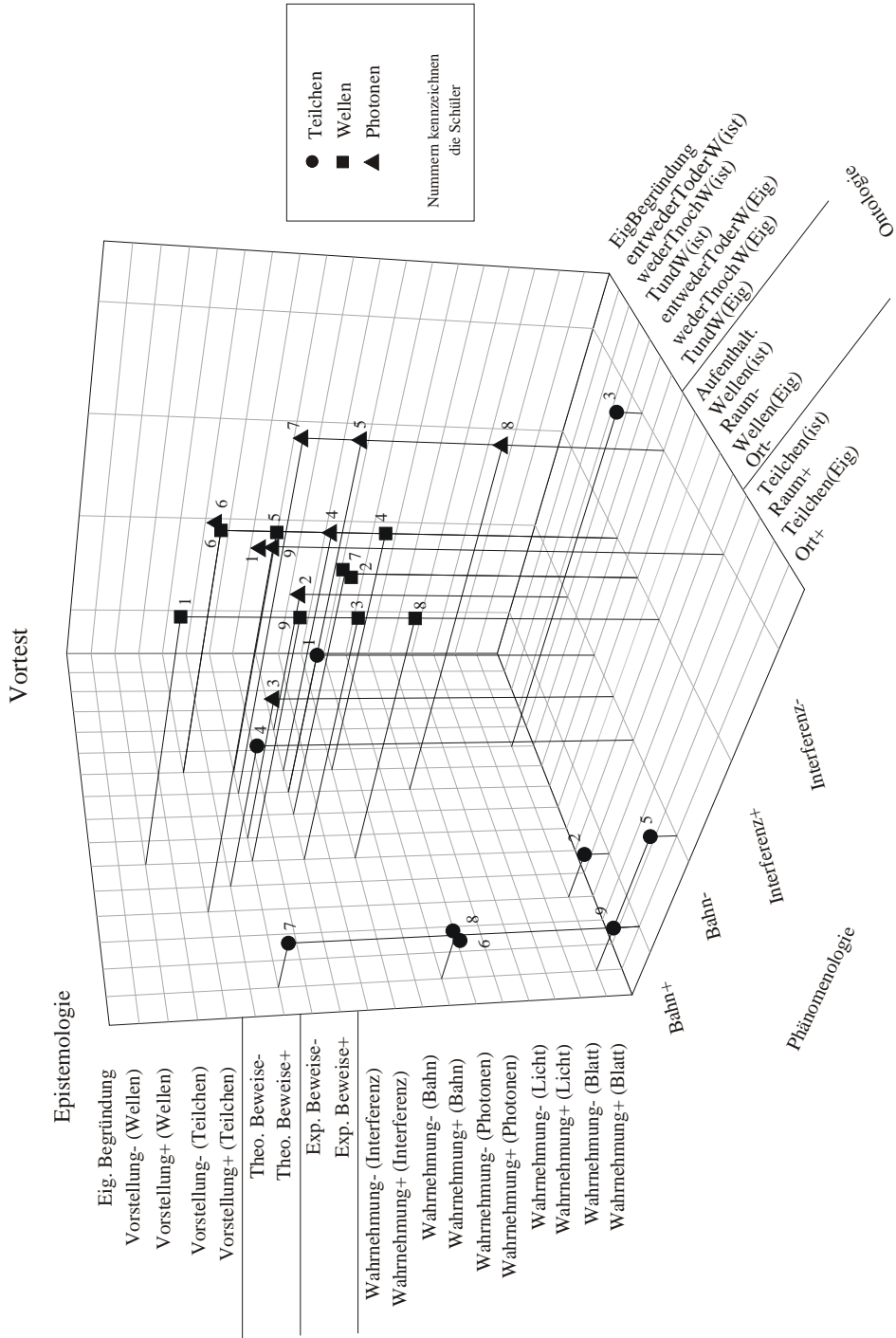


Abbildung 4.6: Der konzeptuelle Raum (Vortest)

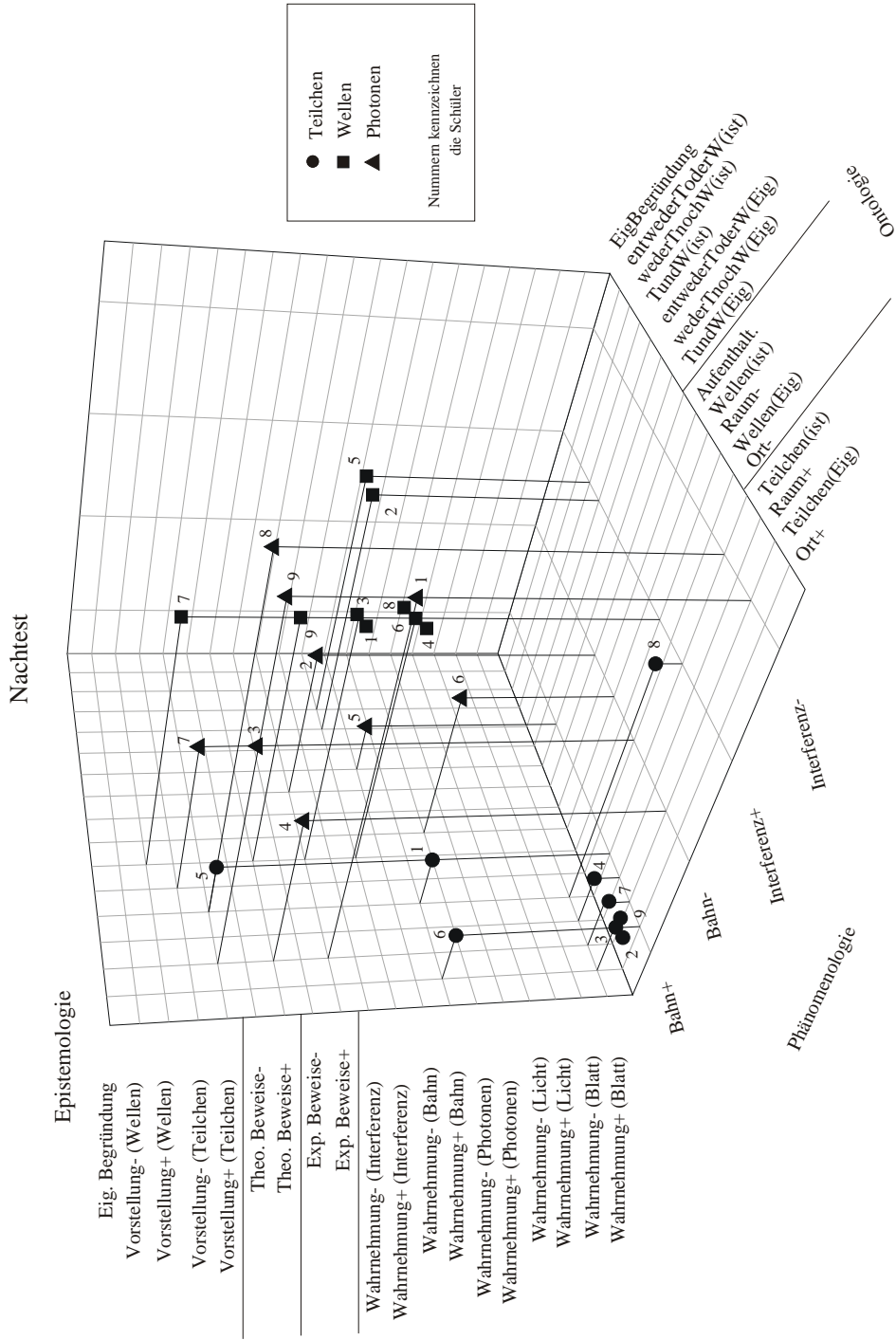


Abbildung 4.7: Der konzeptuelle Raum (Nachttest)

Viele Sätze entsprechend den Aussagen der Schüler für das thematische Feld Teilchenbild (s. Punkte in den Darstellungen des konzeptuellen Raumes in der Abbildungen 4.6 und 4.7) konzentrieren sich im Vortest auf der Linie, die auf den Punkt $P(\text{Phänomenologie, Ontologie}) = P(\text{Bahn+, Ort+})$ in der Phänomenologisch-Ontologische Ebene projiziert wird. Im Nachtest lässt sich eine Häufung von Sätzen in den Punkten P feststellen, die mit $P(\text{Phänomenologie, Ontologie, Epistemologie}) = P(\text{Bahn+, G. Teilchen, Wahrnehmung})$ beschrieben werden. Dies bedeutet, dass viele Schüler das Objekt Blatt mit dem Begriff Bahn und mit Satzelementen aus der Gruppe Teilchen und der Gruppe Wahrnehmung in Verbindung gebracht haben. Die Verbindung zwischen dem Satzelement Bahn+ und den Satzelementen der Gruppe Teilchen ist im Feld Teilchenbild erwünscht, denn es signalisiert, dass die Schüler die Teilchenbeschreibung für das Objekt Blatt annehmen. Die Auswahl von Satzelementen aus der Gruppe Wahrnehmung auf der Epistemologie-Achse signalisiert eine naiv-realistische Orientierung in den Schülervorstellungen.

Für das thematische Untersuchungsfeld Wellenbild (s. Vierecke in den Darstellungen des konzeptuellen Raumes) konzentrieren sich die Sätze der Schüler sowohl im Vortest als auch im Nachtest am meisten auf der Linie, die auf den Punkt $P(\text{Interferenz+, Ort-})$ auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene projiziert wird. Dies bedeutet, dass viele Schüler das Objekt Licht mit dem Begriff Interferenz und mit Satzelementen der Gruppe Wellen verknüpft haben. Die Verbindung zwischen dem Begriff Interferenz und den Satzelementen der Gruppe Wellen wird im Feld Wellenbild erwartet, denn dies signalisiert, dass die Schüler die Wellenbeschreibung für das Objekt Licht annehmen.

Für das thematische Feld Photonen (s. Dreiecke in den Darstellungen des konzeptuellen Raumes) lässt sich hingegen weder im Vortest noch im Nachtest eine eindeutige Häufung von Punkten im konzeptuellen Raum beobachten. Dieses Ergebnis signalisiert möglicherweise folgendes: Es sind bei den Schülern keine eindeutigen homogenen Vorstellungen über das Verhalten von Photonen vorhanden. Hätte man hingegen ein Muster im konzeptuellen Raum für das Objekt Photon gefunden, wie es beispielsweise für die Felder Teilchenbild im Nachtest zu beobachten ist, dann hätte man feststellen können, dass die Schüler bestimmte Vorstellungen über das Verhalten von Photonen besitzen. Dies ist an dieser Stelle nicht der Fall.

In der Darstellung der Sätze im konzeptuellen Raum im Vortest ist eine Doppelbelegung festzustellen. So treffen sich im Punkt $P = P(\text{Interferenz+, Teilchen und Wellen (Eigenschaften), Vorstellung+(Teilchen)})$ zwei Aussagen (von dem Schüler 6), von denen sich die eine auf das Objekt Photonen, die andere auf das Objekt Wellen bezieht (s. Abb. 4.6). Dies lässt sich folgendermaßen interpretieren: Der Schüler hat dieselben Satzelemente verknüpft – d.h. er hat dasselbe "Skript" verwendet – für die Aussage im Feld Photonen und im Feld Wellenbild. Dies signalisiert, dass der Schüler grundsätzlich das Verhalten von Photonen mit dem Verhalten von Wellen identifiziert. Im Gegensatz zum

Vortest lässt sich keine Doppelbelegung im Nachtest beobachten, was bedeutet, dass die Schüler das Verhalten von Photonen vom Verhalten von Teilchen bzw. von Wellen in irgendwelcher Form unterscheiden.

Um das Verhalten der Schülern näher zu interpretieren, werden die Sätze der Schüler in den folgenden Abschnitten aus der Perspektive von zwei Ebenen des konzeptuellen Raumes – der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene und der Phänomenologisch-Epistemologischen Ebene – dargestellt:

- Die Phänomenologisch-Ontologische Ebene des konzeptuellen Raumes wird durch die Achsen Phänomenologie und Ontologie aufgespannt.
- Die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene des konzeptuellen Raumes wird durch die Achsen Phänomenologie und Epistemologie aufgespannt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wollen wir – wie schon in den vorigen Abschnitten erwähnt wurde – die Schülervorstellungen über Photonen im Hinblick auf ihre Vorstellungen über das Verhalten von Teilchen und Wellen kennenlernen. Bevor wir uns mit den Schüleraussagen über Photonen beschäftigen, werden wir uns deshalb mit den Schüleraussagen in den Untersuchungsfeldern Teilchenbild und Wellenbild befassen.

4.3.2.2 Schüleraussagen im thematischen Feld Teilchenbild

In der Unterrichtskonzeption werden Teilchen als lokalisierbare Objekte, an denen zu jedem Zeitpunkt eine Ortsmessung möglich ist, bezeichnet. Die “Geschichte eines bewegten Teilchens” ist eine Kette von Ereignissen und kann durch die Bahn des Teilchens dargestellt werden. Daher wollen wir im Untersuchungsfeld Teilchenbild erforschen, ob die Schüler den Begriff Teilchen mit dem Begriff Bahn und mit den Satzelementen der Gruppe Teilchen (d.h. mit Teilcheneigenschaften wie beispielsweise Lokalisierbarkeit) verknüpfen. Um der üblichen Darstellung von Teilchen als kleine kugelförmige Objekte zu entgegen, wird das Verhalten eines Teilchens im Fragebogen am Beispiel eines Blattes beim Fallen erörtert.

Teilchenbild aus der Perspektive der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene

In der Abbildung 4.8, S. 102 ist die Phänomenologisch-Ontologische Ebene des konzeptuellen Raums für das Objekt Blatt gezeichnet. Auf dieser Ebene sind Verknüpfungen zwischen Satzelementen aus dem zweiten und dritten Feld des Fragebogens (Phänomene bzw. Ontologische Aussagen) bezüglich des Objektes Blatt dargestellt. Aus der Perspektive dieser Ebene ist folgendes zu beobachten:

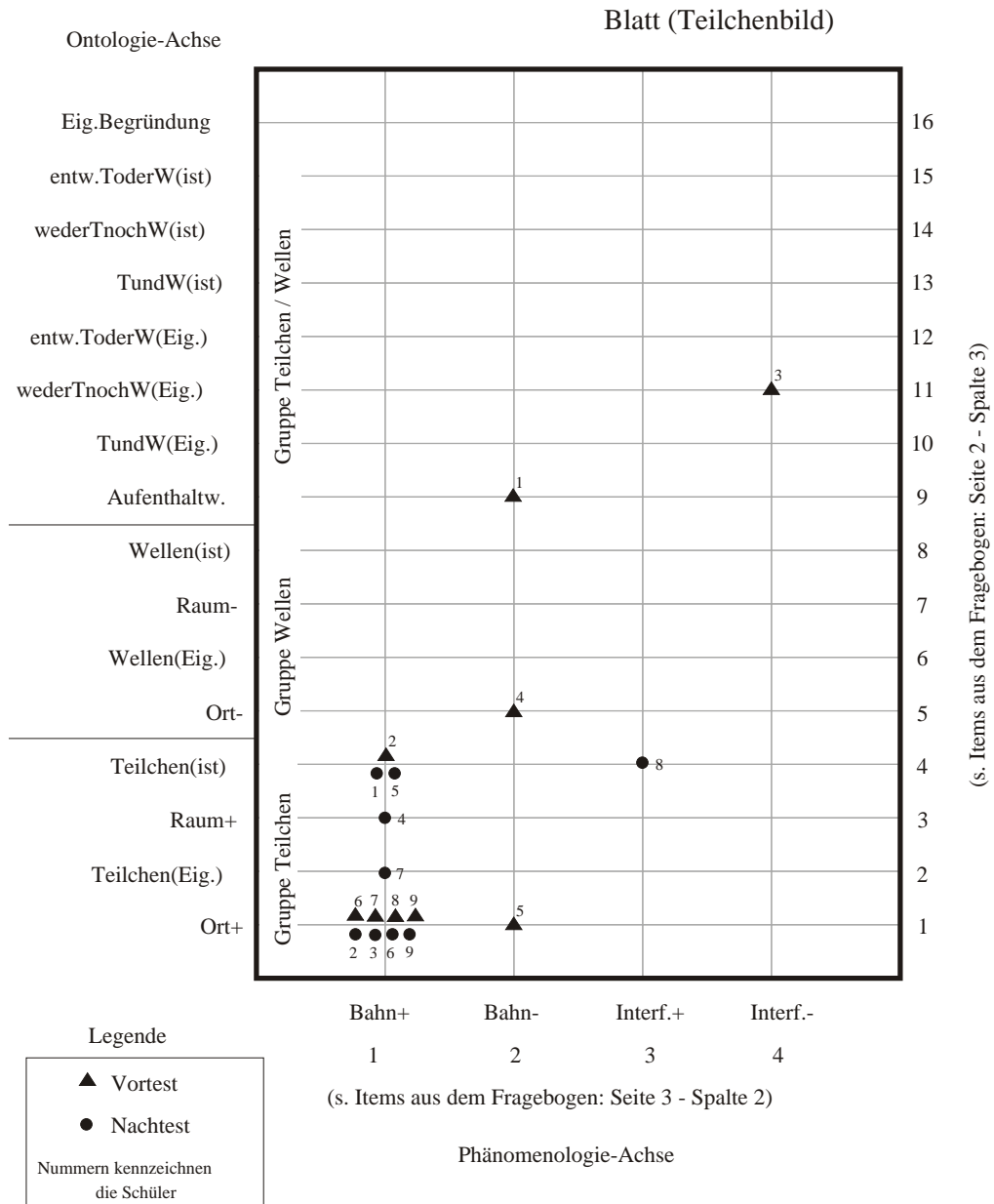


Abbildung 4.8: Die Phänomenologisch-Ontologische Ebene für das thematische Untersuchungsfeld Teilchenbild

Sowohl im Vortest als auch im Nachtest haben sich die Mehrheit der Schüler für das Satzelement “beschreibt bestimmte Bahnen” entschieden (s. Phänomenologie-Achse in der Abbildung 4.8 – Schüler: 2, 6, 7, 8 und 9 im Vortest und Schüler: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 9 im Nachtest). Alle diese Schüler haben das Satzelement “beschreibt bestimmte Bahnen” mit einem Satzelement der “Gruppe Teilchen” verknüpft (s. Ontologie-Achse, Satzelemente 1 bis 4 in der Darstellung der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene). Die Anzahl der Schüler, die das Satzelement “beschreibt bestimmte Bahnen” mit einem Satzelement der “Gruppe Teilchen” verbunden haben, ist im Nachtest gestiegen. Die Verbindungen von Satzelementen innerhalb des Bereiches “beschreibt bestimmte Bahnen / Gruppe Teilchen” ist positiv einzuschätzen, denn diese Verknüpfungen stimmen mit der Teilchenbeschreibung für das Objekt Blatt überein.

Bei vier Schülern (Schüler: 2, 6, 7 und 9) sind sowohl im Vortest als auch im Nachtest die Verbindungen “beschreibt bestimmte Bahnen / Gruppe Teilchen” zu beobachten. Aus der Sicht des Unterrichtskonzepts haben diese Schüler die Satzelemente entsprechend den Kategorien Objekte, Phänomene und Ontologische Aussagen im Untersuchungsfeld Teilchenbild sowohl im Vortest als auch im Nachtest mit Erfolg verknüpft.

Vier andere Schüler (Schüler: 1, 3, 4 und 5) haben das Objekt Blatt mit dem Satzelement Bahn+ im Vortest nicht verknüpft. Diese Schüler verbinden die Satzelemente “beschreibt bestimmte Bahnen / Gruppe Teilchen” erst im Nachtest.

Der Schüler 8, der sich im Vortest für die Satzkombination “beschreibt bestimmte Bahnen / Gruppe Teilchen” entschieden hat, lehnt im Nachtest das Satzelement “beschreibt bestimmte Bahnen” zugunsten des Satzelements “kann Interferenz verursachen” ab. Im Fall dieses Schülers lässt sich eine unerwünschte Veränderung auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene feststellen. Das Verhalten dieses Schülers kann signalisieren, dass sich die Betrachtung von Photonen bezüglich des Begriffes Bahn auch negativ auf die Schülervorstellung über das Teilchenbild auswirken kann.

Teilchenbild aus der Perspektive der Phänomenologisch-Epistemologischen Ebene

In ähnlicher Art wie im vorigen Abschnitt werden die Sätze der Schüler für das Objekt Blatt auf die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene des konzeptuellen Raumes projiziert. Die Betrachtung der Schüleraussagen aus der Perspektive dieser Ebene kann uns bei der Interpretation des Schülerverhaltens im Feld Teilchenbild weiterhelfen. Aus der Perspektive der Phänomenologisch-Epistemologischen Ebene lässt sich beispielsweise überprüfen, ob die Aussagen der Schüler logisch konsistent sind. In anderen Worten: In einem Satz, der beispielsweise aus den Satzelementen “Blatt \rightarrow Bahn+ \rightarrow Ort+ \nrightarrow Wahrnehmung+(Interferenz)” besteht, lässt sich eine zusammenhanglose Verbindung in dem letzten Teil des Satzes (entsprechend der Kategorie Epistemologische Aussagen) feststellen. Solcher Satz ist nicht logisch konsistent und er wird daher nicht erwünscht.

Im Hinblick auf die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene lässt sich auch erkennen, ob die Schüler bevorzugte Vorstellungen (naiv-realistische, pragmatische, begriffliche oder anschauliche Orientierungen) mit der physikalischen Erkenntnisgewinnung über die vorgestellte Problemsituation in Verbindung bringen.

Die Sätze der Schüler für das Untersuchungsfeld Teilchenbild werden aus der Perspektive der Phänomenologisch-Epistemologischen Ebene in der Abbildung 4.9, S. 105 dargestellt. Mit Hilfe der Darstellung lässt sich folgendes erkennen:

Sieht man von dem Schüler 4 im Vortest ab, der sich für das Satzelement “keine Theorie das beweisen kann” (Theo. Beweise-) entschieden hat, wählen die Schüler sowohl im Vortest als auch im Nachtest passende Satzergänzungen für ihre Aussagen im Feld Teilchenbild.

Die Schüler tendieren sowohl im Vortest als auch im Nachtest zu den Verbindungen zwischen den Satzelementen “Bahn+ / Gruppe Wahrnehmung”, was eine naiv-realistische Orientierung in den Schülervorstellungen signalisiert. Im Vortest entscheiden sich vier Schüler (Schüler: 2, 6, 8 und 9) und im Nachtest sieben Schüler (Schüler: 1, 2, 3, 4, 6, 7 und 9) für die Verbindungen “Bahn+/Gruppe Wahrnehmung”. Drei von diesen Schülern (Schüler: 2, 6, und 9) wählen sowohl im Vortest als im Nachtest solche Verbindungen und zeigen auch erwünschte Satzkombinationen auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene (s. Abb. 4.8). Im Fall dieser Schüler lassen sich nun sowohl im Vortest als auch im Nachtest angemessene Aussagen mit naiv-realistischer Orientierung über das Teilchenbild beobachten und daher wird keine Veränderung zwischen Vortest und Nachtest festgestellt. Bei dem Schüler 3 wird dagegen eine erwünschte Veränderung auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene beobachtet und bei dem Schüler 8 eine unerwünschte Veränderung auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene festgestellt.

Im Fall der Schüler: 1, 4 und 7, die sich nur im Nachtest für ein Satzelement der “Gruppe Wahrnehmung” entschieden haben, folgt: Bei den Schülern 1 und 4 werden erwünschte Aussagen auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene auch erst im Nachtest beobachtet, so dass bei diesen Schülern erwünschte Veränderungen festzustellen sind. Der Schüler 7 zeigt sowohl im Vortest als auch im Nachtest erwünschte Verbindungen von Satzelementen auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene. Auf der Epistemologie-Achse wählt der Schüler im Vortest eine Aussage aus der “Gruppe Theo. Beweise” und im Nachtest eine Aussage aus der “Gruppe Wahrnehmung”. Der Schüler zeigt auf diese Weise angemessene Aussagen im Feld Teilchenbild mit begrifflicher Orientierung im Vortest und mit naiv-realistischer Orientierung im Nachtest.

Bei dem Schüler 5 lässt sich im Feld Teilchenbild eine erwünschte Aussage (mit anschaulicher Orientierung) im Nachtest erkennen.

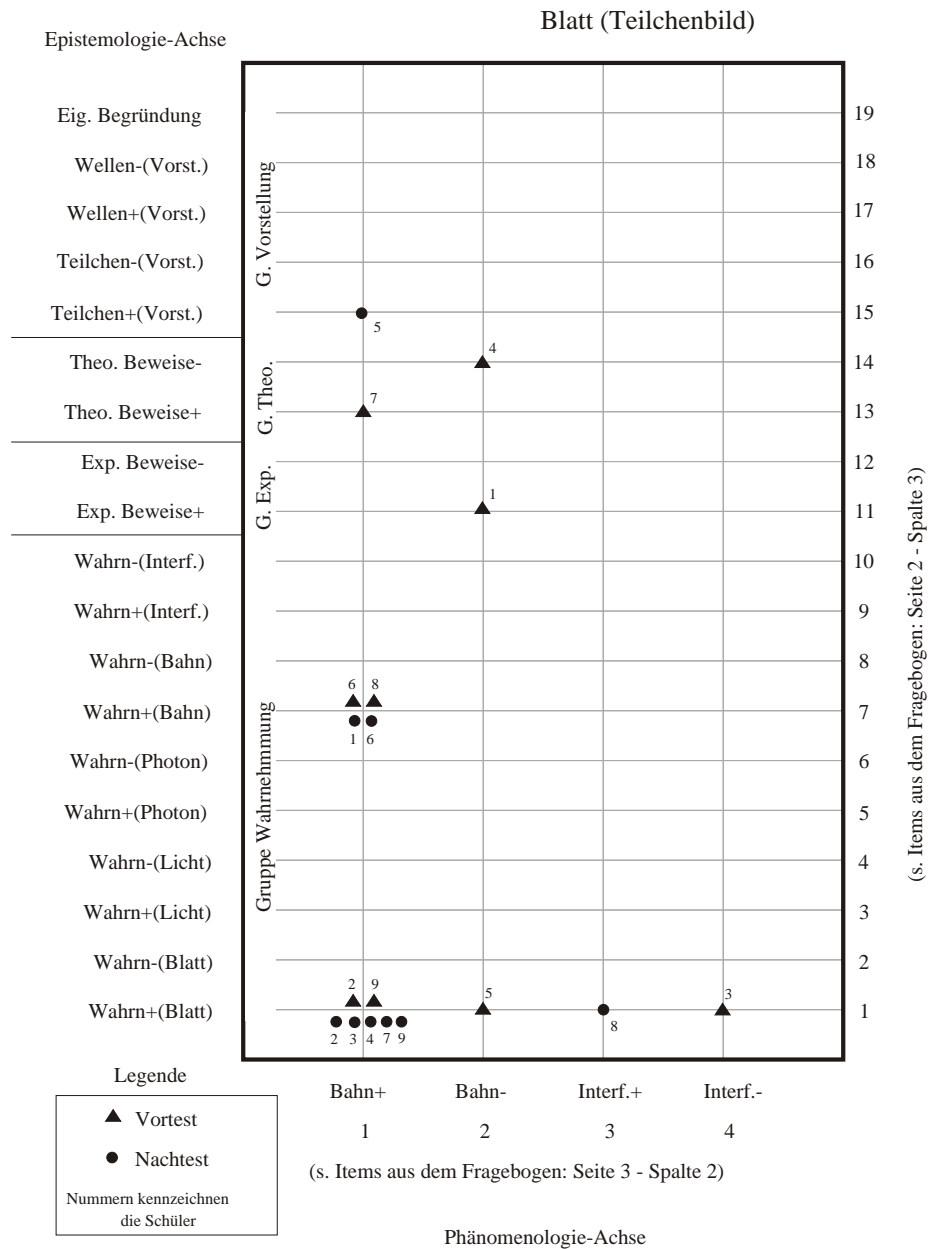


Abbildung 4.9: Die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene für das thematische Untersuchungsfeld Teilchenbild

Schülerverhalten im thematischen Feld Teilchenbild: Zusammenfassung

Zum Zwecke der Vereinheitlichung der in den vorigen Abschnitten dargestellten Auswertung der Sätze der Schüler wird ein Muster zur Auswertung der Sätze verwendet. Es wird in der Abbildung 4.10, S. 107 vorgestellt¹. In dem Auswertungsmuster werden die Ausdifferenzierungen für die Achsen Phänomenologie, Ontologie und Epistemologie des konzeptuellen Raumes zugunsten der Bildung von logisch-konzeptuellen Bereichen ausgelassen. Diese Vereinfachung hat sich als sinnvoll erwiesen, da in der detaillierten Ausdifferenzierung der Schüler-Sätze bezüglich der einzelnen Kategorien keine eindeutigen Tendenzen und keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den Sätzen für die unterschiedlichen Untersuchungsfelder erkennbar waren. Die konzeptuellen Bereiche, die in der Darstellung der Abbildung 4.10 mit Hilfe der Kennzeichnungen "Diskursive Aussagen", "Klassische Aussagen", "Gekoppelte Aussagen" und "Zusammenhanglose Aussagen"; und der Kennzeichnungen "Tdis", "Tklas", und "TW" präsentiert werden, werden in der Abbildung 4.11, S. 108 im Hinblick auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene des konzeptuellen Raumes näher erläutert.

In der Abbildung 4.11 wird die Phänomenologisch-Ontologische Ebene mit Hilfe der folgenden Bereiche unterschieden: Bereich der gekoppelte Aussagen (TW), Bereich der klassischen Aussagen (klas), Bereich der diskursiven Aussagen (dis) und Bereich der zusammenhanglosen Aussagen (Zs.lose). Diese Bereiche werden auf der x-Achse in der Darstellung in der Abbildung 4.10, S. 107 dargestellt.

Die Kennzeichnungen: "nrealistisch", "pragmatisch", "begrifflich" und "anschaulich" auf der y-Achse in der Abbildung 4.10 entsprechen den in den Gruppen "Wahrnehmung", "Exp. Beweise", "Theo. Beweise" und "Vorstellung" auf der Phänomenologie-Achse des konzeptuellen Raumes zusammengefassten Aussagen.

In Übereinstimmung mit der in den vorigen Abschnitten präsentierten Analyse der Schüleraussagen bzw. in Übereinstimmung mit der Auswertung der Sätze mit Hilfe des Auswertungsmusters werden die Sätze der Schüler für das Feld Teilchenbild – je nach der Platzierung des Satzes in den Bereichen der Darstellung in der Abbildung 4.10, S. 107 – mit den Kennzeichnungen: Tk (gekennzeichnete Bereiche in der Darstellung) oder Tnk (für die übrigen Bereiche) kodiert. Die Kennzeichnungen Tk und Tnk bezeichnen Sätze in der folgenden Weise:

Tk = "klassische Aussagen" über das Teilchenbild (angemessene Vorstellungen),

Tnk = "keine klassischen Aussagen" über das Teilchenbild

(Das Entsprechende gilt für das thematische Feld Wellenbild bezüglich der Bezeichnungen Wk und Wnk).

¹Dieses Auswertungsmuster wird weiterhin auch für die Analyse der Schüleraussagen in den Feldern Wellenbild und Photonen verwendet.

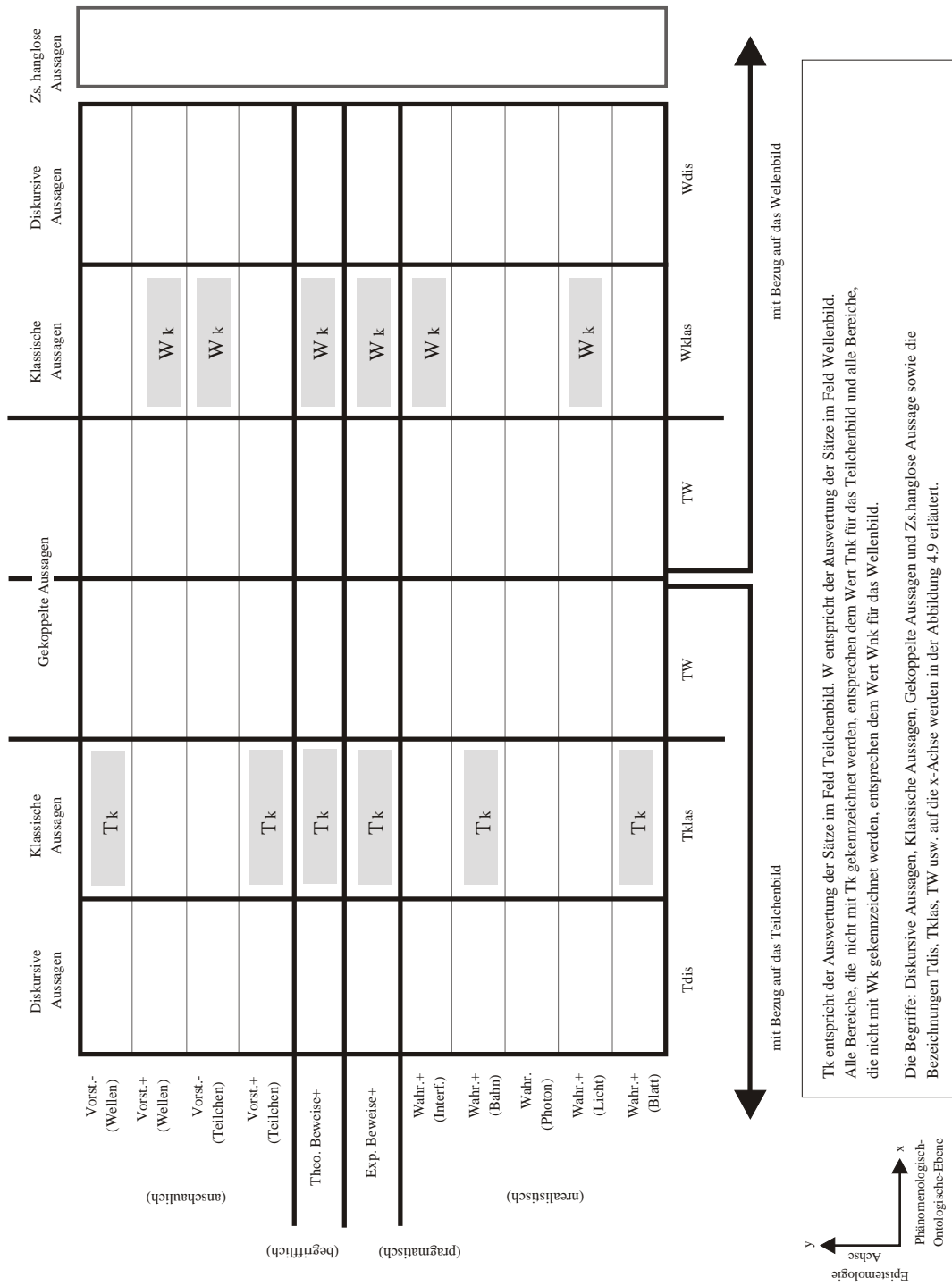


Abbildung 4.10: Antwortmuster zur Auswertung der Sätze

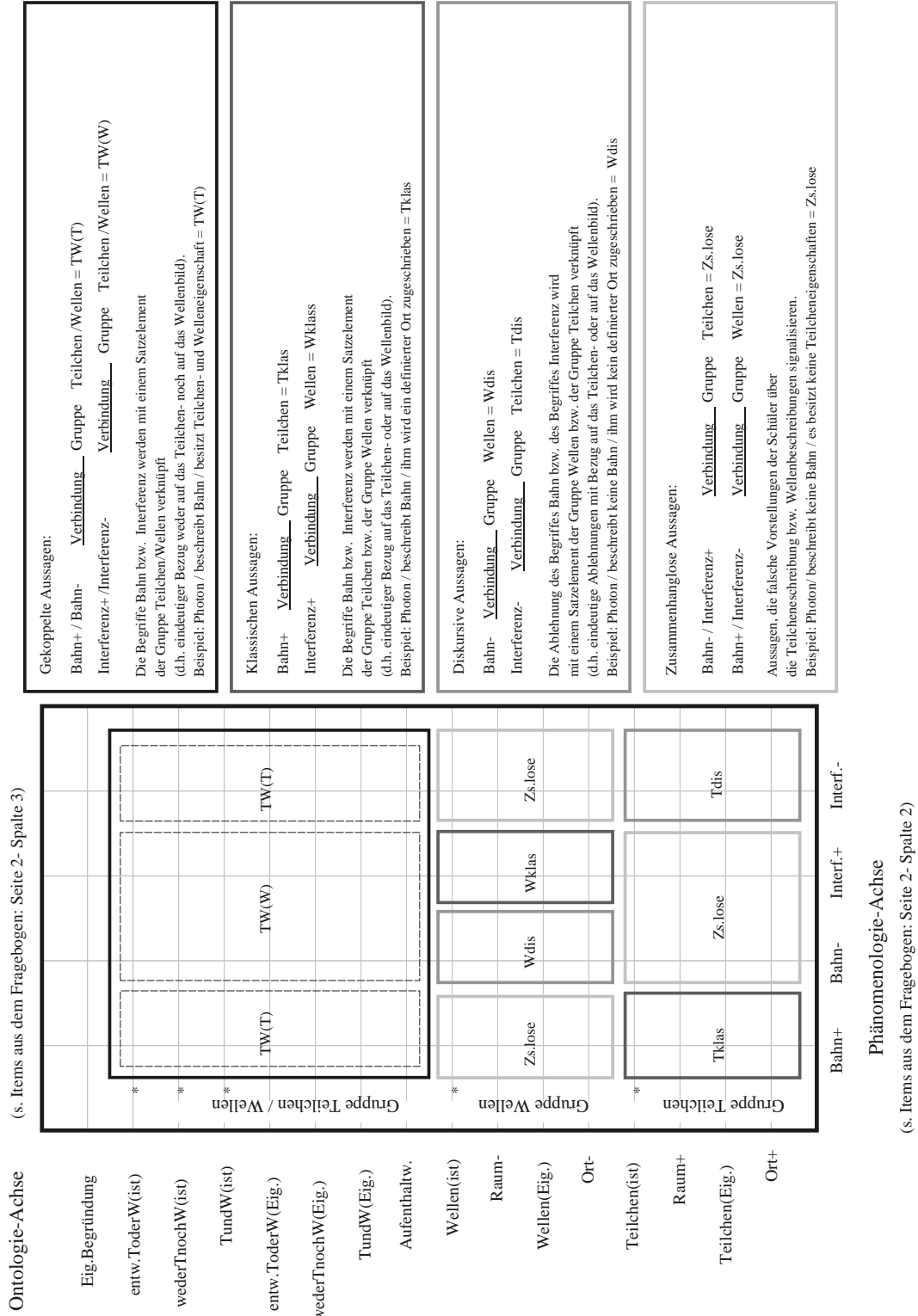


Abbildung 4.11: Bereiche im konzeptuellen Raum

In der Abbildung Abb. 4.12, S. 110 sind die Ergebnisse für das Feld Teilchenbild angegeben. Daraus erkennt man folgendes:

Sieht man von dem Schüler 8 ab, dann lässt sich feststellen, dass alle Schüler klassische Aussagesätze (Tk) mit naiv-realistischer Orientierung im Nachtest zeigen. Die Hälfte der Schüler hatte diese Aussagen bereits im Vortest gezeigt.

Sowohl im Vortest als auch im Nachtest lässt sich eine naiv-realistische Orientierung in den Schüleraussagen beobachten.

4.3.2.3 Schüleraussagen im thematischen Feld Wellenbild

In derselben Art wie in der in den vorigen Abschnitten vorgestellten Analyse der Schüleraussagen im Feld Teilchenbild werden die Sätze der Schüler zum thematischen Untersuchungsfeld Wellenbild aus der Perspektive der zwei Ebenen des konzeptuellen Raumes dargestellt und mit Hilfe des in der Abbildung 4.10 vorgestellten Auswertungsmusters klassifiziert.

In der Unterrichtskonzeption wird Licht mit Bezug auf das Wellenmodell betrachtet. Im Gegensatz zu den Teilchen lassen sich Lichtwellen nicht im Raum lokalisieren. Daher wollen wir im Untersuchungsfeld Wellenbild beobachten, ob die Schüler den Begriff Licht mit dem Begriff Interferenz und mit Aussagen der Gruppe Wellen verbinden.

Wellenbild aus der Perspektive der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene

In der Abbildung 4.13, S. 111 ist die Phänomenologisch-Ontologische Ebene des konzeptuellen Raums für das Objekt Licht dargestellt.

Aus der Perspektive dieser Ebene lässt sich feststellen, dass sowohl im Vortest als auch im Nachtest alle Schüler die Satzelement "Interferenz+" auf der Phänomenologie-Achse ausgewählt haben und dass sich die Mehrheit der Schüler für die Verknüpfung zwischen dem Satzelement "kann Interferenz verursachen" und einem Satzelement aus der "Gruppe Wellen" entschieden haben (Schüler: 1, 2, 3, 7, 8 und 9 im Vortest und Schüler: 1, 3, 4, 6, 7, 8 und 9 im Nachtest). Die Verbindung von Satzelementen innerhalb dieses Bereiches ist generell positiv einzuschätzen, denn sie stimmt mit dem Wellenmodell für das Licht überein.

Wellenbild aus der Perspektive der Phänomenologisch-Epistemologischen Ebene

In der Abbildung 4.14, S. 112 ist die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene des konzeptuellen Raums für das Objekt Licht skizziert.

Schülerverhalten im thematischen Feld Teilchenbild

	Diskursive Aussagen	Klassische Aussagen	Gekoppelte Aussagen		Klassische Aussagen	Diskursive Aussagen	Zs. hanglose Aussagen
anschaulich		NT: 5					VT: 5 NT: 8
begrifflich		VT: 7				VT: 4	
pragmatisch				VT: 1			
nrealistisch		VT: 2, 6, 8, 9 NT: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9	VT: 3				
	Tdis	Tklas	TW	TW	Wklas	Wdis	

← mit Bezug auf das Teilchenbild
mit Bezug auf das Wellenbild →

Nachttest (NT)

		T _{nk}	T _k
Vortest (VT)	T _{nk}		1, 3, 4 und 5
	T _k	8	2, 6, 7 und 9

T_{nk}: Keine klassischen Vorstellungen
 T_k: Klassische Vorstellungen
 Nummern kennzeichnen die Schüler

Abbildung 4.12: Schülerverhalten im thematischen Feld Teilchenbild

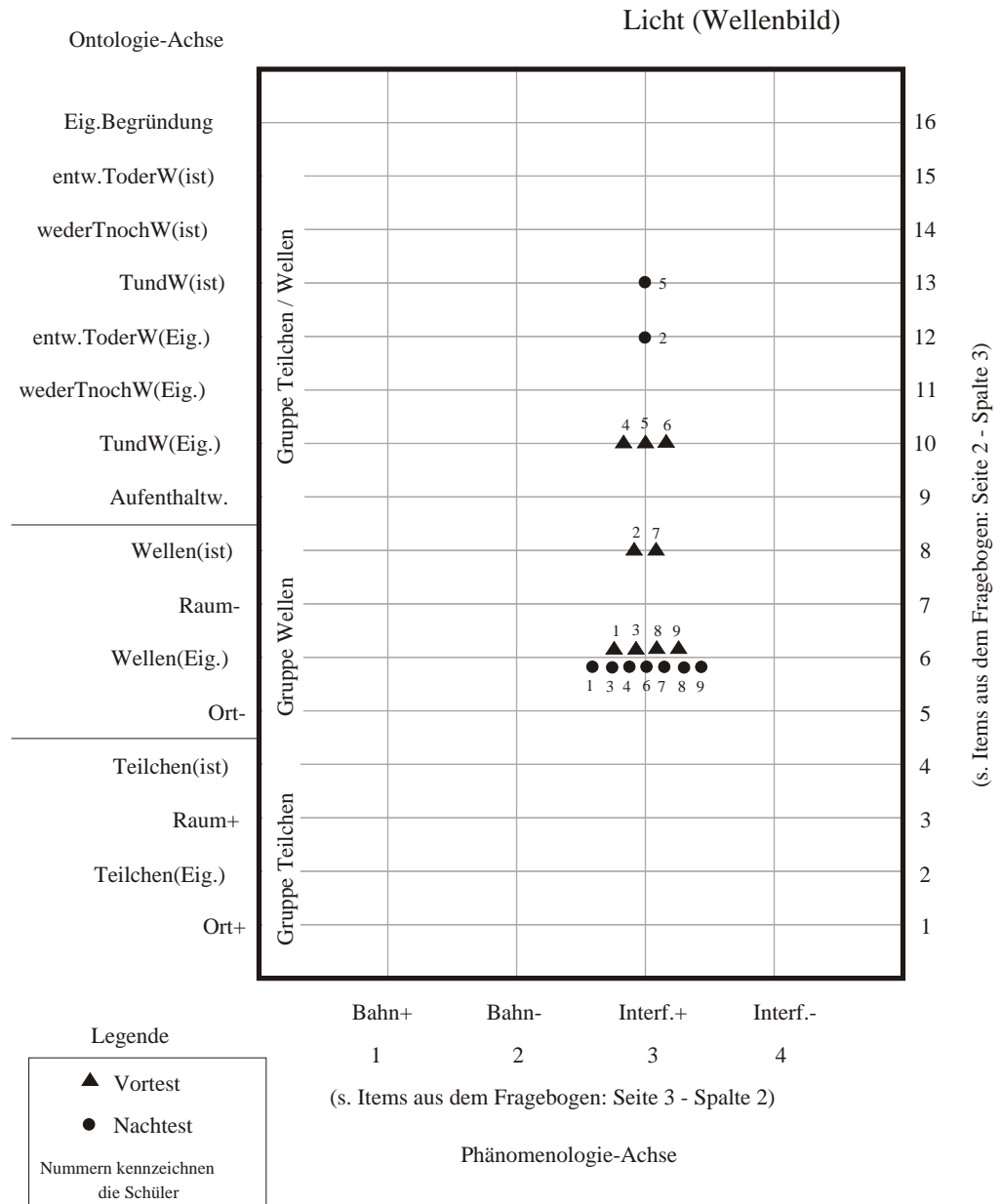


Abbildung 4.13: Die Phänomenologisch-Ontologische Ebene für das thematische Untersuchungsfeld Wellenbild

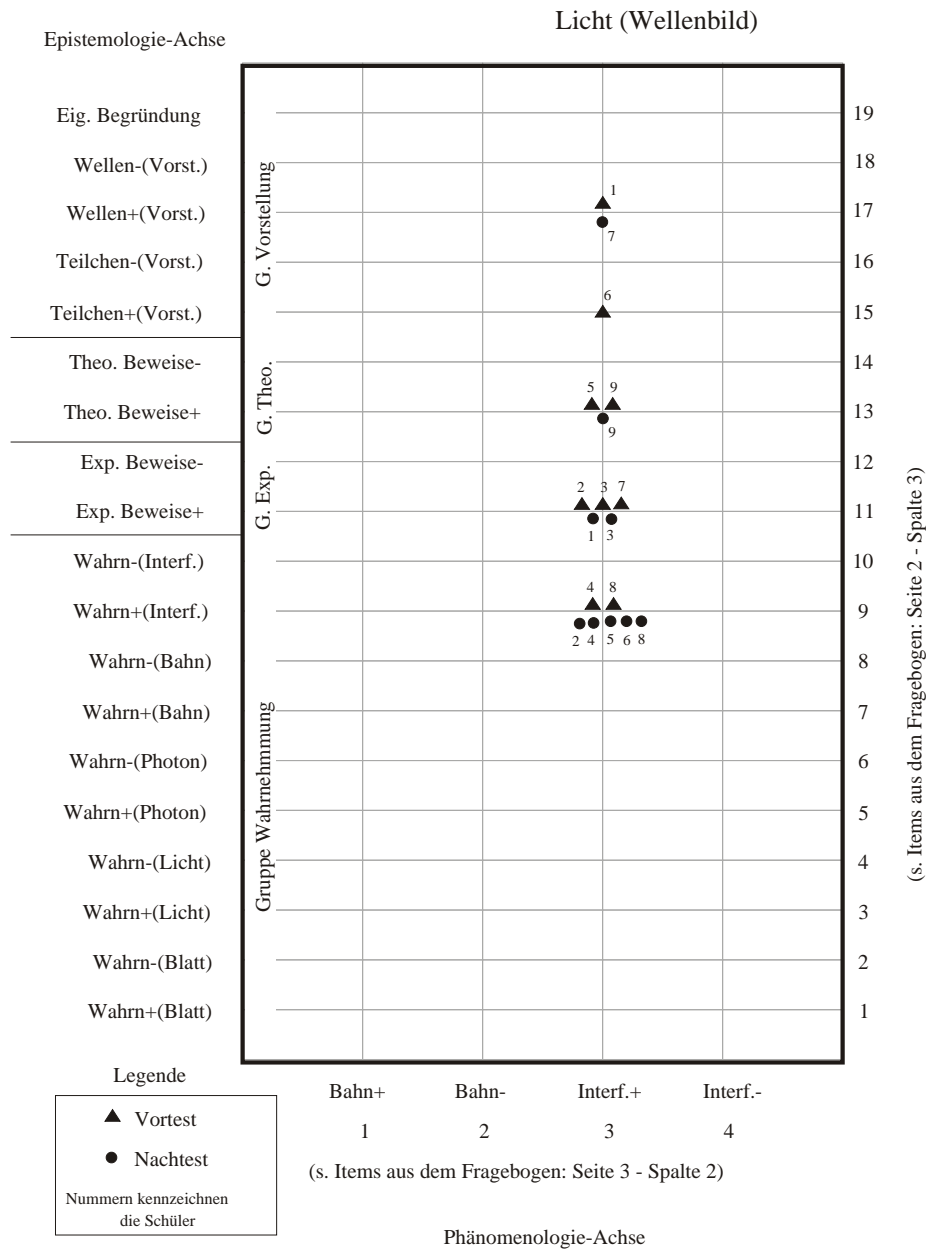


Abbildung 4.14: Die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene für das thematische Untersuchungsfeld Wellenbild

Sieht man von dem Schüler 6 im Vortest ab, der das Satzelement "Teilchenvorstellung" ausgewählt hat, wählen alle Schüler passende Satzergänzungen aus der Epistemologie-Achse für das Objekt Licht.

Entsprechend der Klassifizierung der Sätze der Schüler für das Feld Teilchenbild werden die Sätze der Schüler für das Feld Wellenbild mit den Kennzeichnungen W_k und W_{nk} – je nach der Platzierung der Sätze in der Abbildung 4.10 – kodiert, wobei:

W_k = "klassische Aussagen" über das Wellenbild (angemessene Vorstellungen),

W_{nk} = "keine klassischen Aussagen" über das Wellenbild.

Schülerverhalten im thematischen Feld Wellenbild: Zusammenfassung

Die Ergebnisse für das Feld Wellenbild werden in der Abbildung 4.15, S. 114 zusammengefasst. Daraus folgt:

Sieht man von den Schülern 2 und 5 ab, dann lässt sich feststellen, dass alle Schüler im Nachtest klassische Aussagen im Wellenbild zeigen. Über die Hälfte dieser Schüler hatte diese Aussagen bereits im Vortest gezeigt.

Im Nachtest zeigt sich bei den Schülern eine Tendenz zu den Aussagen mit naiv-realistischen Orientierung.

Schülerverhalten in Thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild

In der Abbildung 4.16, S. 115 wird das Verhalten der Schüler bezüglich ihrer Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild zusammengefasst. Mit Hilfe der Darstellung lässt sich erkennen, dass die Zahl der Schüler, die am Ende der Unterrichtseinheit klassische Aussagen sowohl im Feld Teilchenbild auch als im Feld Wellenbild zeigen, gestiegen ist. Die Verbindungen von Satzelementen im Bereich der klassischen Aussagen ist aus der Sicht der Unterrichtskonzeption generell positiv einzuschätzen, denn diese Aussagen stimmen mit der Teilchenbeschreibung für das Objekt Blatt bzw. mit der Wellenbeschreibung für das Licht überein.

Bezüglich der Schüleraussagen über die Erkenntnisgewinnung über die Objekte bzw. Phänomene der Untersuchung sind keine eindeutigen Tendenzen im Verhalten der Schüler festzustellen. Bei vielen Schülern lässt sich jedoch Aussagen mit naiv-realistischer Orientierung beobachten.

Die Schüleraussagen über Photonen werden im Folgenden mit Berücksichtigung auf die oben zusammengefassten Ergebnisse betrachtet.

Schülerverhalten im thematischen Feld Wellenbild

	Diskursive Aussagen	Klassische Aussagen	Gekoppelte Aussagen		Klassische Aussagen	Diskursive Aussagen	Zs. hanglose Aussagen
anschaulich				VT: 6	VT: 1 NT: 7		
begrifflich				VT: 5	VT: 9 NT: 9		
pragmatisch					VT: 2, 3, 7 NT: 1, 3		
nrealistisch				VT: 4 NT: 2, 5	VT: 8 NT: 4, 6, 8		
	Tdis	Tklas	TW	TW	Wklas	Wdis	

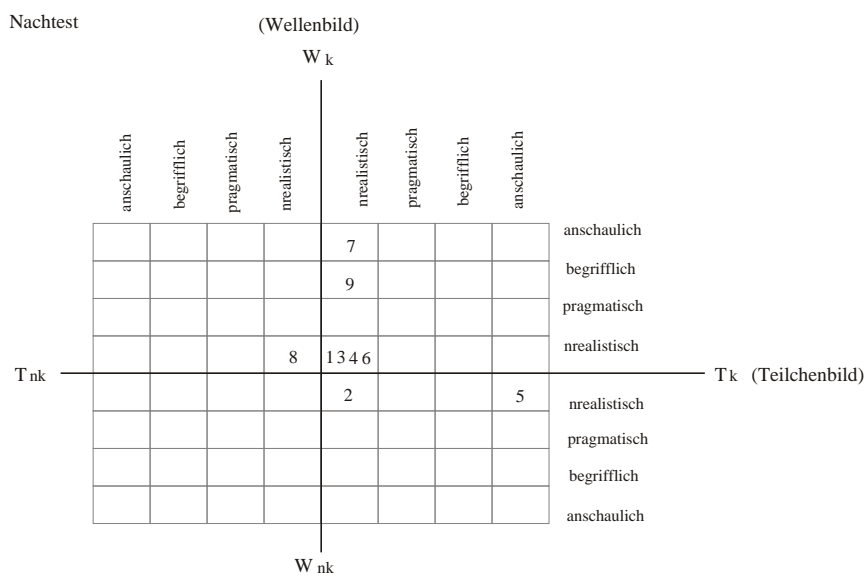
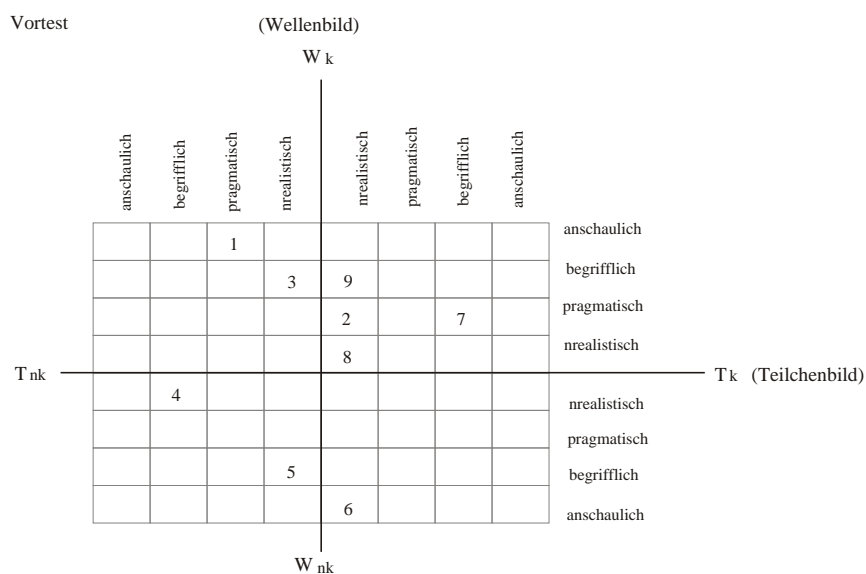
← mit Bezug auf das Teilchenbild
mit Bezug auf das Wellenbild →

Nachttest (NT)

		W _{nk}	W _k
Vortest (VT)	W _{nk}	5	4 und 6
	W _k	2	1, 3, 7, 8 und 9

W_{nk} : Keine klassischen Vorstellungen
 W_k: Klassische Vorstellungen
 Nummern kennzeichnen die Schüler

Abbildung 4.15: Schülerverhalten im thematischen Feld Wellenbild



Nummern kennzeichnen die Schüler

T_{nk} , T_k , W_{nk} und W_k : Schülerverhalten in thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild (s. Abbildungen 4.11 und 4.149)

Abbildung 4.16: Schülerverhalten in den thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild

4.3.2.4 Das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen

Das Verhalten von Photonen wird im Rahmen der vorliegenden Unterrichtskonzeption – wie bereits im Abschnitt 2.3 dieser Arbeit erwähnt wurde – im Mach-Zehnder-Interferometer bezüglich der Komplementarität zwischen Weginformation und Interferenzerscheinung betrachtet. Weginformation bezieht sich auf die Möglichkeit, eine Ortsmessung an einem lokalisierten Objekt zu jedem Zeitpunkt zu verwirklichen. Dies entspricht dem Teilchenbild. Das Teilchenbild schließt allerdings die Interferenzerscheinung aus, denn die Herausbildung eines Interferenzmusters setzt die Überlagerung voraus und dies lässt sich nur im Wellenbild beschreiben. So verschwindet das Interferenzbild bei jedem Versuch, die Information über den Weg von Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer zu erhalten. In der Schilderung dieser Problemsituation liegt der Schwerpunkt des Unterrichts. Im Unterricht geht es nun nicht darum, die Frage “Was ist das Photon” zu beantworten oder ein Modell für das Verhalten von Photonen zu vermitteln, sondern den Schüler das Verhalten von Photonen als problemhaftes Phänomen vorzustellen. Das Photon ist etwas Fremdes und Befremdliches und die Aufgabe ist, dies – im Hinblick auf die Beschränkung des Teilchenbildes bzw. des Wellenbildes für Photonen – den Schülern bewusst zu machen.

Die Betrachtung des Verhaltens von Photonen aus einer epistemologischen Perspektive als problemhaftes Phänomen bietet optimale didaktische Bedingungen, um das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen zu erforschen. Wie am Anfang dieses Kapitels bereits erwähnt, stellt das konzeptuelle Profil der Schüler eine “Topografie” der Schülervorstellungen dar, in der die Schüleraussagen über Photonen in unterschiedlichen Dimensionen beobachtet werden können (s. Abb. 4.1, S. 87): Zum einen werden die Schüleraussagen über Photonen aus einer phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Perspektive berücksichtigt (bezüglich der im konzeptuellen Raum vorgestellten Untersuchungskategorien). Daher wollen wir wissen, ob die Verwendung von bestimmten Kategorien bzw. Gruppen von Kategorien in den Sätzen der Schüler über Photonen bevorzugt werden und ob die Schüleraussagen begrifflich-logisch konsistent sind. Zum anderen werden die Aussagen der Schüler über Photonen aus der Sicht ihrer Aussagen in den Untersuchungsfeldern Teilchenbild und Wellenbild, die ihrerseits auch bezüglich der phänomenologischen, ontologischen und epistemologischen Kategorien ausgewertet wurden, betrachtet. Daher wollen wir wissen, ob einige Zusammenhänge zwischen den Schülerverhalten im Feld Photonen und in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild vorhanden sind.

Schüleraussagen aus der Perspektive der Ebenen des konzeptuellen Raumes

Entsprechend der Betrachtung der Sätze der Schüler in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild werfen wir zuerst einen Blick auf die Aussagen der Schüler für Photonen

aus der Perspektive der Ebenen des konzeptuellen Raumes. Mit Hilfe der Darstellungen der Ebenen des konzeptuellen Raumes in den Abbildungen 4.17, S. 118 (Phänomenologisch-Ontologische Ebene) und 4.18, S. 119 (Phänomenologisch-Epistemologische Ebene) lassen sich bereits einige Bemerkungen über das Verhalten der Schüler im Feld Photonen machen: Im Gegensatz zu den Feldern Teilchenbild und Wellenbild sind beispielsweise im Feld Photonen sowohl im Vortest als auch im Nachtest keine eindeutigen Häufungen (Tendenzen) weder auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene (Abb. 4.17) noch auf der Phänomenologisch-Epistemologischen Ebene (Abb. 4.18) festzustellen. Dies signalisiert folgendes: a) Es sind keine gemeinsamen homogenen Vorstellungen über Photonen bei den Schülern vorhanden. b) Die Schüler verwenden im Feld Photonen nicht dasselbe "Skript" wie im Feld Teilchenbild und auch nicht wie im Feld Wellenbild. In anderen Worten: Während beispielsweise in den thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild die Bereiche "Bahn+/Gruppe Teilchen" bzw. "Interferenz+/Gruppe Wellen" auf der Phänomenologie-Achse am häufigsten belegt werden, werden diese Bereiche im Feld Photonen nicht besetzt. Es ist daher zu vermuten, dass die Schüler sowohl im Vortest als auch im Nachtest das Verhalten von Photonen nicht mit den "klassischen" Teilchen- bzw. Wellenbeschreibungen beschreiben wollen.

Zum Zwecke einer Zusammenfassung werden die Schüleraussagen aus der Sicht einzelner Achsen des konzeptuellen Raumes im Hinblick auf ihr Verhalten in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild in den Tabellen der Abbildung 4.19, S. 121 präsentiert. Die Kennzeichnungen T_k , T_{nk} , W_k und W_{nk} entsprechen den in der Abbildung 4.16, S. 115 vorgestellten Bezeichnungen für klassische Aussagen bzw. keine klassischen Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild. Mit Hilfe der Tabellen lässt sich beispielsweise folgendes erkennen:

Die Mehrheit der Schüler, die sich im Nachtest für das Satzelement "Bahn-" im Feld Photonen entschieden haben (4 von 5 Schülern), zeigen sowohl im Feld Teilchenbild als auch im Feld Wellenbild klassischen Aussagen. Daher ist zu vermuten, dass diese Schüler angemessene Vorstellungen über das Teilchenbild und das Wellenbild besitzen und darüber hinaus die Bahnbeschreibung für Photonen ablehnen. Die Ablehnung des Begriffes Bahn durch die Schüler kann signalisieren, dass die Schüler eine Beschränkung in der Teilchenbeschreibung für Photonen wahrgenommen haben.

Die Schüleraussagen über Photonen lassen sich wie ihre Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild am besten aus einer holistischen Perspektive interpretieren, aus der die begriffliche logische Konsistenz der Sätze überprüft werden kann. Begriffliche logische Konsistenz bedeutet hier, dass in den Aussagen keine zusammenhanglose Verbindung zwischen den Satzelementen – wie beispielsweise keine Bahn \nrightarrow Teilchen(Eigenschaft) – festgestellt wird. Um die logische Konsistenz der Schüleraussagen über Photonen zu analysieren, werden die Sätze der Schüler über Photonen den logisch-konzeptuellen Bereichen der Abbildung 4.10, S. 107 zugeordnet.

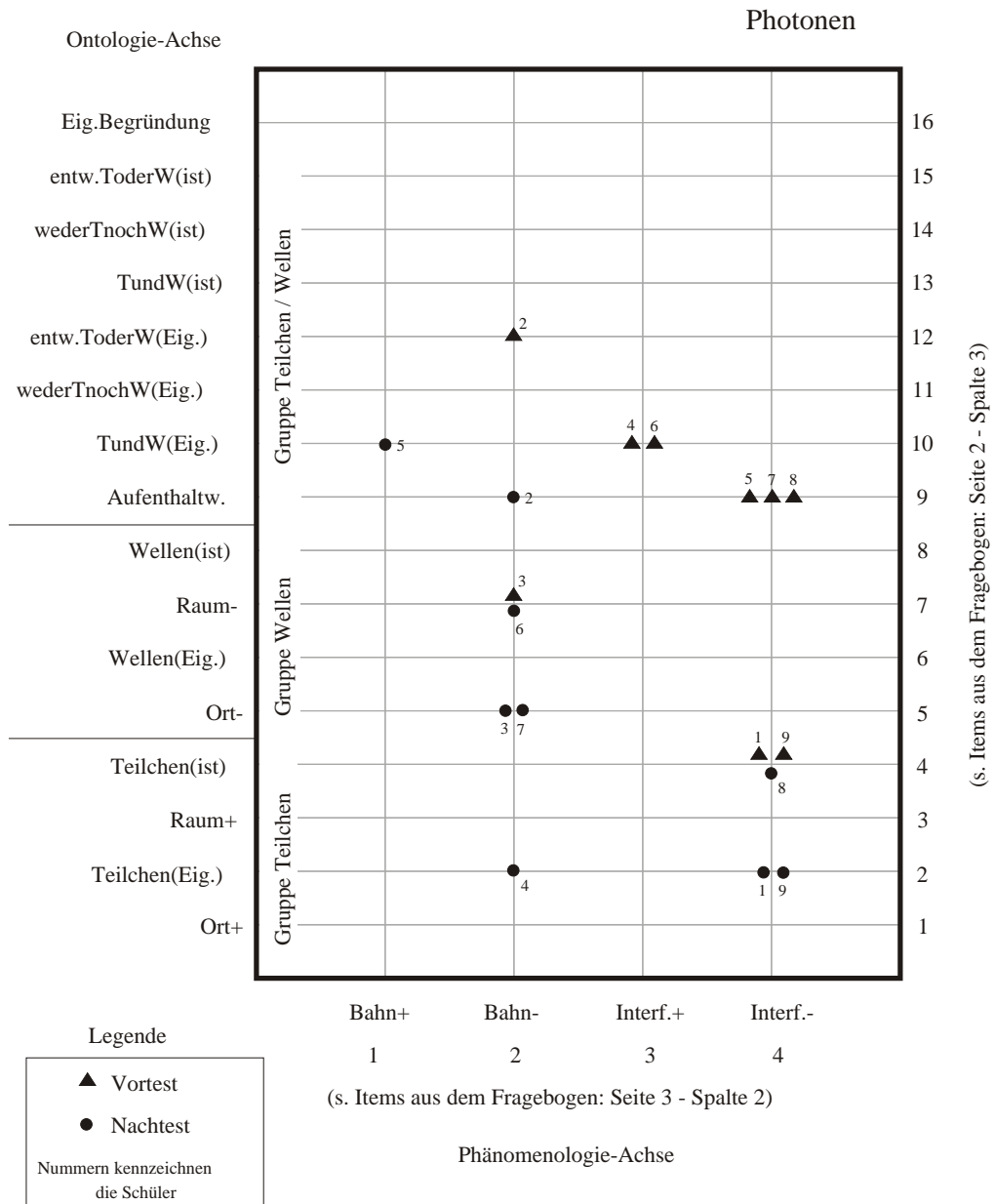


Abbildung 4.17: Die Phänomenologisch-Ontologische Ebene für das thematische Untersuchungsfeld Photonen

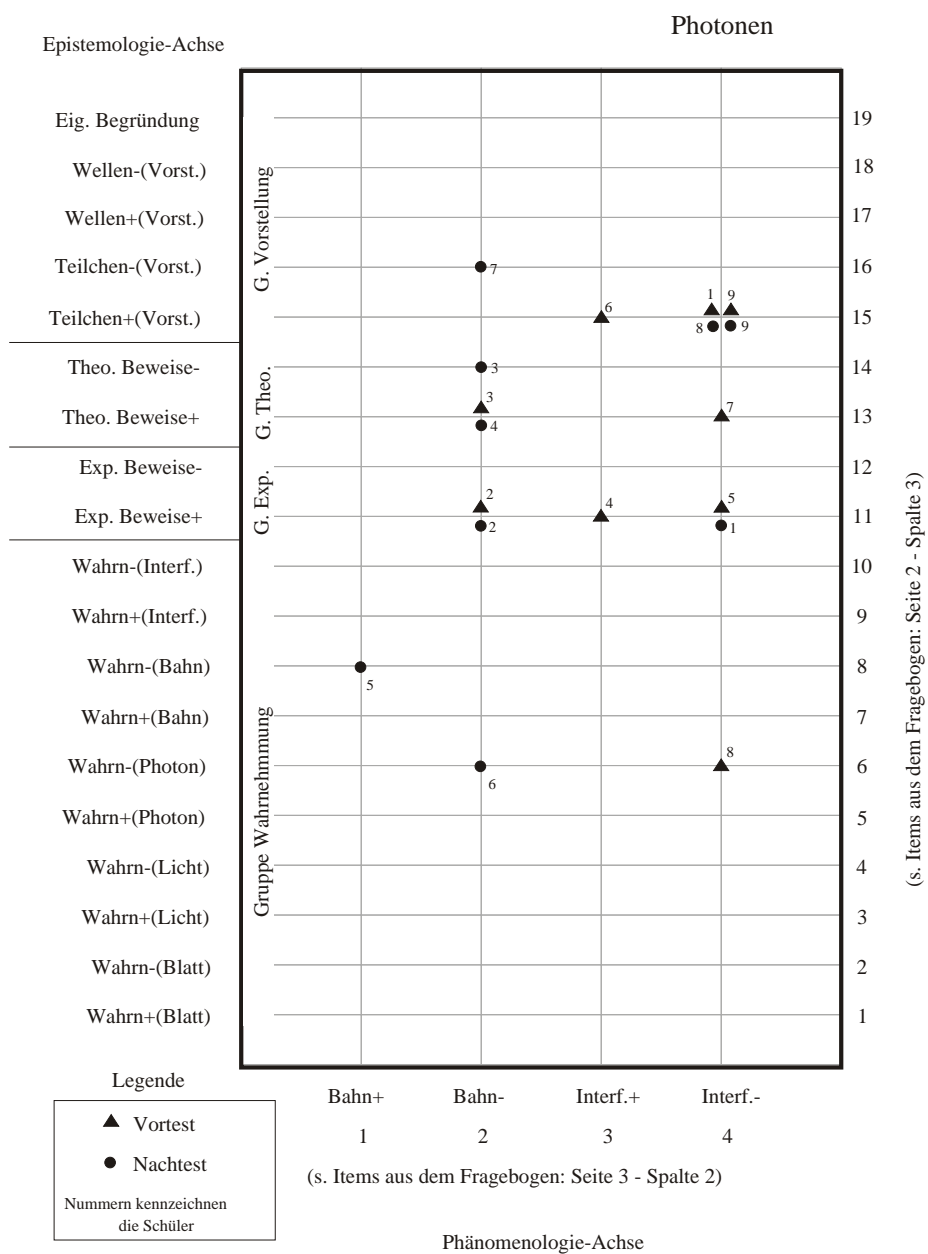


Abbildung 4.18: Die Phänomenologisch-Epistemologische Ebene für das thematische Untersuchungsfeld Photonen

Begriffliche logische Konsistenz in den Schüleraussagen über Photonen

Die Ergebnisse der Zuordnung der Sätze der Schüler für Photonen in die konzeptuelle Bereiche werden in den Darstellungen der Abbildung 4.20, S. 122 bezüglich des Schülerverhaltens in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild präsentiert.

Mit Hilfe der Darstellungen erkennt man, dass im Feld Photonen im Unterschied zu den Feldern Teilchenbild und Wellenbild kein Satz dem Bereich der “klassischen Aussagen” zugeordnet wird (Vergleich Abbildung 4.20 mit den Abbildungen 4.12, S. 110 und 4.15, S. 114). Im Feld Photonen lässt sich im Vortest eine Tendenz² (6 von 9 Schülern) zum Satzaufbau im Bereich der “gekoppelten Aussagen” (s. Abb. 4.20) und im Nachtest eine Tendenz (6 von 9 Schülern) zum Satzaufbau im Bereich der “diskursiven Aussagen” feststellen. Tendenzen in den Schüleraussagen bezüglich der Erkenntnisgewinnung über das Verhalten von Photonen sind weder im Vortest noch im Nachtest festzustellen.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Verhalten der Schüler im Feld Photonen und in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild im Vortest lässt sich auch nicht beobachten. Im Bereich der gekoppelten Aussagen im Vortest sind sowohl Schüler mit klassischen Vorstellungen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild (s. Schüler 2, 7 und 8) als auch Schüler mit keinen klassischen Vorstellungen in den Feldern Teilchenbild bzw. Wellenbild (s. Schüler 4 und 5) festzustellen. Im Nachtest zeigen – abgesehen von einem Schüler (Schüler 8) – alle Schüler, die sich im Bereich der “diskursiven Aussagen” befinden, klassische Vorstellungen sowohl im Feld Teilchenbild als auch im Feld Wellenbild (TkWk).

Das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen: Interpretation

Die Tendenz zu den “gekoppelten Aussagen” im Vortest kann signalisieren, dass die Schüler – auch wenn sie im formalen Unterrichtskontext über das Verhalten Photonen noch nicht unterrichtet wurden – gewisse Erwartungen (Vorstellungen) über den Begriff Photon besitzen. Möglicherweise ahnen die Schüler bereits vor dem Unterricht, dass Photonen anders als die “gewöhnlichen Objekte” Teilchen und Wellen sind. Daher verwenden die Schüler unterschiedlichen Satzstrukturen (Skripte) für Photonen als die, die sie in Feldern Teilchenbild und Wellenbild verwendet haben. Dies bedeutet jedoch nicht unbedingt, dass die Schüler das Verhalten von Photonen im Hinblick auf das Teilchenbild bzw. das Wellenbild als ein Dilemma wahrnehmen. In den gekoppelten Aussagen lässt sich eine “gewisse Harmonie” zwischen dem Teilchenbild und dem Wellenbild spüren und daraus entsteht vermutlich die Bevorzugung der gekoppelten Aussagen durch die Schüler. Dieses Ergebnis stimmt mit Auffassungen einiger

²Hierbei gilt der Begriff “Tendenz”, wenn $nb = (nk/2)$, wobei nb = Anzahl von beobachteten Schülern und nk = Anzahl von beobachteten Schülern bezüglich einer bestimmten Kategorie / Kategoriengruppe

Aussagen der Schüler im thematischen Feld Photonen
aus der Sicht der Achsen des konzeptuellen Raumes und mit Berücksichtigung
der Schüleraussagen in den Thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild

		<u>Vortest</u>					<u>Nachtest</u>				
		TkWk	TkWnk	TnkWk	TnkWnk	Σ	TkWk	TkWnk	TnkWk	TnkWnk	Σ
<u>Phänomenologie</u>	Bahn+					0		1			1
	Bahn-	1		1		2	4	1			5
	Interf.+		1		1	2					0
	Interf.-	3		1	1	5	2		1		3
	Σ	4	1	2	2	9	6	2	1	0	9
<u>Ontologie</u>	G. Teilchen	1		1		2	3		1		4
	G. Wellen			1		1	3				3
	G. Teilchen/ Wellen	3	1		2	6		2			2
	Σ	4	1	2	2	9	6	2	1	0	9
<u>Epistemologie</u>	Wahr.	1				1	1	1			2
	Exp.	1			2	3	1	1			2
	Theo.	1		1		2	2				2
	Vorst.	1	1	1		3	2		1		3
	Σ	4	1	2	2	9	6	2	1	0	9

Die Nummern kennzeichnen die Häufigkeiten der Auswahl der
Satzelemente aus den entsprechenden Gruppen.

Tk, Tnk, Wk, Wnk: klassische / keine klassischen Aussagen
in den Feldern Teilchenbild bzw. Wellenbild.

Abbildung 4.19: Überblick: Schülerverhalten im thematischen Feld Photonen

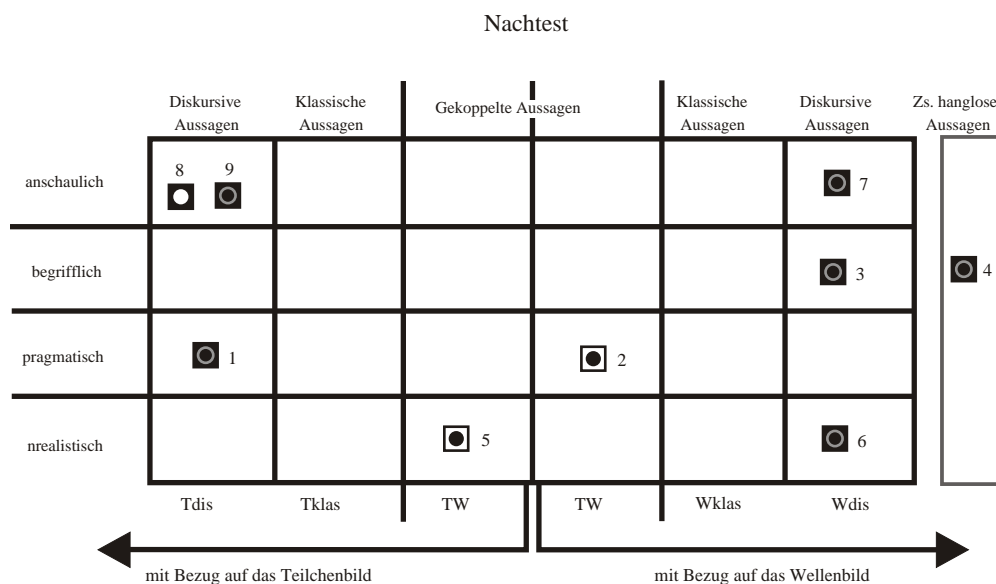
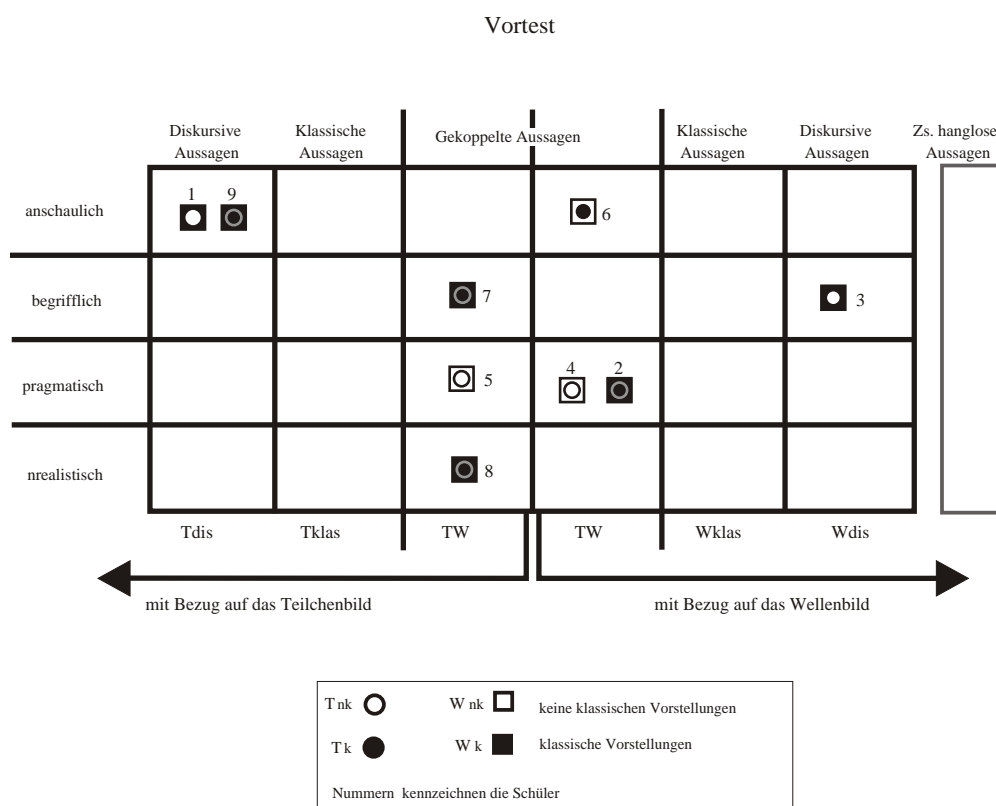


Abbildung 4.20: Das konzeptuelle Profil der Schüler

Autoren überein, in denen behauptet wird, dass die Schüler das Thema Quantenphysik spontan mit der Idee einer “Verbindung Teilchen–Wellen” assoziieren [Pessoa Jr. 1997].

Im Nachtest zeigt die Mehrheit der Schüler “diskursive Aussagen” im Feld Photonen und “klassische Aussagen” in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild. Die Tendenz zur Auswahl von Sätzen im Bereich der diskursiven Aussagen im Nachtest kann signalisieren, dass die Schüler die Beschränkung des Teilchenbildes bzw. des Wellenbildes für die Beschreibung des Verhaltens von Photonen wahrgenommen haben, denn einerseits sind die diskursiven Aussagen begrifflich logisch konsistent, andererseits zeigen die Schüler angemessene Vorstellungen über das Teilchenbild und das Wellenbild. Dies sei im Folgenden am konkreten Beispiel eines Schülers (Schüler 6) erläutert. Bei diesem Schüler sind folgende Verbindungen auf der Phänomenologisch-Ontologischen Ebene festzustellen:

Im Vortest:

Für das Feld Teilchenbild: Bahn+ → Gruppe Teilchen

Für das Feld Wellenbild: Interferenz+ → Gruppe Teilchen/Wellen

Für das Feld Photonen: Interferenz+ → Gruppe Teilchen/Wellen

Im Nachtest:

Für das Feld Teilchenbild: Bahn+ → Gruppe Teilchen

Für das Feld Wellenbild: Interferenz+ → Gruppe Wellen

Für das Feld Photonen: Bahn- → Gruppe Wellen

Für das Feld Teilchenbild hat der Schüler sowohl im Vortest als auch im Nachtest Satzelemente im Bereich der klassischen Aussagen verknüpft. Daher vermuten wir, dass der Schüler im Vortest und im Nachtest angemessene Vorstellungen über das Verhalten von Teilchen besitzt.

Im Feld Wellenbild hingegen befindet sich der Schüler erst im Nachtest im Bereich der klassischen Aussagen. Im Vortest erkennt man dieselbe Satzstruktur in den Aussagen des Schülers für Photonen und für das Wellenbild. Da der Schüler im Vortest den Begriff Interferenz innerhalb des Feldes Wellenbild nicht erfolgreich verwendet hat, gehen wir davon aus, dass er keine angemessene Vorstellung über Interferenz besitzt und die Schüleraussage für Photonen im Vortest (bezüglich des Begriffes Interferenz) nicht eindeutig zu interpretieren ist. In anderen Worten: Die Aussage des Schülers über Photonen lässt sich nicht im “Bezugssystem Teilchenbild – Wellenbild” charakterisieren.

Im Nachtest zeigt der Schüler im Feld Wellenbild einen Satz in dem Bereich der klassischen Aussagen. Dies ist aus der Sicht des Unterrichtskonzepts positiv anzusehen. Es signalisiert, dass der Schüler eine angemessene Vorstellung über das Wellenbild entwickelt hat. Die Aussage des Schülers über Photonen im Nachtest wird nun durch seine angemessenen Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild validiert. Daher gehen wir davon aus, dass die Ablehnung des Begriffes Bahn im Zusammenhang

mit der Ablehnung der räumlichen Abgrenzung für Photonen (s. Schüler 6 in der Abb. 4.17, S. 118) eine “zuverlässige Aussage” über die Schülervorstellung über Photonen ist. Sie signalisiert, dass der Schüler eine Begrenzung in der Teilchenbeschreibung für die Beschreibung des Verhalten von Photonen wahrgenommen hat, was – aus der Sicht des Unterrichtskonzepts – positiv eingeschätzt wird. Um dies zu erläutern, seien noch einige Bemerkungen zu den Zielen der Unterrichtskonzeption und der Untersuchung gemacht:

Im Unterrichtskonzept wird nicht beabsichtigt, ein “befriedigendes” Modell für Photonen den Schülern zu vermitteln. Wie im Verlauf dieser Arbeit schon erwähnt wurde, geht es in dem vorliegenden entwickelten Unterrichtskonzept vor allem um die Vorstellung einer Frage. Also haben wir uns sowohl im Rahmen des Unterrichtskonzepts als auch im Rahmen der Untersuchung auf einen sehr spezifischen Moment des Lernprozesses konzentriert, und zwar auf den Einstieg in den Lernprozess. Was hier unter Einstieg in den Lernprozess genannt wird, ist der Zeitraum, der die “Entdeckung” der “physikalischen Frage” durch die Schüler umfasst.

In aktuellen Arbeiten der Physikdidaktik haben sich einige Autoren insbesondere mit dieser “Vorphase” des Lernprozesses beschäftigt und daher auf die wichtige Bedeutung dieser Phase für den Lernprozess hingewiesen. In diesem Zusammenhang haben beispielsweise Villani und Cabral [Villani et al. 1997b] eine Analogie zwischen dem (Lacanschen) Therapieprozess und dem Lernprozess gezeigt, wobei in den beiden Fällen die Bewußtseinsbildung der “Patienten” über das zu betrachtende Problem einen wichtigen und langen Teil des Prozesses darstellt. Der “Therapieprozess” fängt nun mit einer “Voranalyse” an, denn zuerst müssen sich die “Patienten” “psychoanalysieren” lassen. Entsprechenderweise findet im wissenschaftlichen Lernprozess eine Phase des “Vorlernens” statt, indem die Schüler zuerst zur Wahrnehmung eines Problems als “wissenschaftliches Problem” geleitet werden müssen.

Bemerkungen zur ersten Teil-Untersuchung

In der Tabelle der Abbildung 4.21 fassen wir das konzeptuelle Profil der Schüler zusammen:

Das konzeptuelle Profil der Schüler im Vortest signalisiert, dass in den Schüleraussagen bereits vor dem Unterricht logische Denkstrukturen – die klassischen Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild und die gekoppelten Aussagen im Feld Photonen – vorhanden sind. Diese Strukturen widerspiegeln möglicherweise die Schülervorstellungen über die Teilchenwelt, die Wellenwelt und die “Photonenwelt”.

Die Umstrukturierungen der Schüleraussagen im Feld Photonen nach dem Unterricht – von den gekoppelten Aussagen im Vortest zu den diskursiven Aussagen im Nachtest – sind ein Indiz dafür, dass die Schüler die diskursiven Aussagen über Photonen erst

bei der Auseinandersetzung mit der vorgestellten physikalischen Problemsituation eingesetzt haben und dass sie daher einen Widerspruch bei der Vorstellung des Verhaltens von Photonen bezüglich des Teilchenbildes bzw. des Wellenbildes empfanden.

Da derselbe Maßstab (d.h. dieselben Satzelemente) für die Konstruktion der Sätze in den Feldern Teilchenbild, Wellenbild und Photonen verwendet wurde – und dies sowohl im Vortest als auch im Nachtest –, können wir davon ausgehen, dass die Veränderungen in den logischen Strukturen der Sätze der Schüler im Nachtest bedeutsam sind.

Aus der Perspektive der in der Abb. 4.20, S. 122 gekennzeichneten Bereiche “mit Bezug auf das Teilchenbild” bzw. “mit Bezug auf das Wellenbild” lässt sich keine Tendenz in den Schüleraussagen feststellen. Die Sätze werden gleichmäßig durch die beiden Bereiche geteilt. Auch bezüglich der Aussagen der Schüler über die Erkenntnisgewinnung über die Objekte bzw. Phänomene der Untersuchung lässt sich bei den Aussagen der Schüler keine Tendenz beobachten, denn die Sätze werden ebenfalls gleichmäßig in den Bereichen “naiv-realistisch”, “pragmatisch”, “begrifflich” und “anschaulich” verteilt (s. Abb. 4.20). Diese Ergebnisse signalisieren, dass eine starke Assoziation der Schülervorstellungen über das Verhalten von Photonen mit einer Teilchen bzw. Wellen-Vorstellung und mit einer bestimmten Orientierung an naiv-realistischer, pragmatischer, begrifflicher oder anschaulicher Position nicht vorhanden ist. Die epistemologische Betrachtung der Welle-Teilchen-Problematik im Unterricht trägt möglicherweise dazu bei, dass sich bei den Schülern keine Neigung zu einer einzigen Position (Teilchen oder Wellen bzw. naiv-realistisch, pragmatisch, usw.) über das Verhalten von Photonen entwickelt; was aus der Sicht der Unterrichtskonzeption positiv anzusehen ist. Inwieweit die Abwesenheit von beobachteten Strukturen im Profil der Schüler die Schülervorstellungen repräsentiert, oder ob sich mit dem Fragebogen die Schülervorstellungen in den oben erwähnten Dimensionen nicht erfassen lassen, kann nicht eindeutig entschieden werden, denn im Vortest wurden bezüglich dieser Dimensionen auch keine Tendenzen beobachtet.

Da der im Rahmen der ersten Teil-Untersuchung entwickelte Fragebogen stark an Begriffen orientiert ist und nicht den “klassischen Formaten” (wie zum Beispiel Multiple-Choice oder Offene-Fragen) entspricht, wurde eine zweite Teil-Untersuchung mit einem Fragebogen durchgeführt, der problembezogene Items enthält, die sich entsprechend dem ersten Fragebogen auf die drei thematischen Untersuchungsfelder Teilchenbild, Wellenbild und Photonen und dementsprechend auf das am Anfang dieses Kapitels präsentierte Kategoriensystem untergliedern. Auf diese Weise wird in der zweiten Teil-Untersuchung das konzeptuelle Profil der Schüler in dem gleichen “Bezugssystem” wie in der ersten Teil-Untersuchung erfasst.

Ergebnisse	Interpretationen
Vortest	
In den thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild: Tendenz zu klassischen Aussagen. Im thematischen Feld Photonen: Tendenz zu gekoppelten Aussagen.	Das Verhalten von Photonen wird durch die Schüler anders als das Verhalten von Teilchen bzw. von Wellen wahrgenommen. Die Schüler haben den Konflikt Welle-Teilchen bezüglich des Verhaltens von Photonen nicht wahrgenommen.
Im Hinblick auf die Schüleraussagen über die Erkenntnisgewinnung über Photonen: Keine beobachtbare Tendenz.	Die Schüler zeigen keine bevorzugte Vorstellung zur Erkenntnisgewinnung über die untersuchten Objekte und Phänomene.
Bezüglich der Untersuchungskategorien Bahn und Interferenz: Keine beobachtbare Tendenz.	Die Schüler verbinden den Begriff Photonen weder vorzugsweise mit dem Begriff Bahn noch vorzugsweise mit dem Begriff Interferenz.
Im Hinblick auf die Schüleraussagen für Photonen und ihre Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild: Kein Zusammenhang.	Die Tendenz zum Satzaufbau im Bereich der gekoppelten Aussagen hängt nicht mit den Schülervorstellungen über das Teilchenbild bzw. das Wellenbild zusammen.
Nachttest	
In den thematischen Feldern Teilchenbild und Wellenbild: Tendenz zu klassischen Aussagen. Im thematischen Feld Photonen: Tendenz zu diskursiven Aussagen.	Das Verhalten von Photonen wird durch die Schüler anders als das Verhalten von Teilchen bzw. von Wellen wahrgenommen. Die Schüler haben die Grenzen des Teilchen- bzw. Wellenbildes bezüglich des Verhaltens von Photonen wahrgenommen.
Im Hinblick auf die Schüleraussagen über die Erkenntnisgewinnung über Photonen: Keine beobachtbare Tendenz.	Die Schüler zeigen keine bevorzugte Vorstellung zur Erkenntnisgewinnung über die untersuchten Objekte und Phänomene.
Bezüglich der Untersuchungskategorien Bahn und Interferenz: Keine beobachtbare Tendenz.	Die Schüler verbinden den Begriff Photonen weder vorzugsweise mit dem Begriff Bahn noch vorzugsweise mit dem Begriff Interferenz.
Im Hinblick auf die Schüleraussagen für Photonen und ihre Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild: Kein Zusammenhang.	Die Schüler, die erwünschte Aussagen in den Feldern Teilchenbild und Wellenbild zeigen, tendieren im Feld Photonen zum Satzaufbau im Bereich der diskursiven Aussagen.
Veränderungen: Vortest → Nachttest	
Aussagen: Im thematischen Feld Photonen	In den thematischen Feldern Teilchen- und Wellenbild
Gekoppelte Aussagen → Gekoppelte Aussagen (2 Schüler)	Verschlechterung
Diskursive Aussagen → Diskursive Aussagen (3 Schüler)	Verbesserung / Konstant (+)
Gekoppelte Aussagen → Diskursive Aussagen (3 Schüler)	Verbesserung / Konstant (+)
Gekoppelte Aussagen → Zs. hanglose Aussagen (1 Schüler)	Verbesserung

Abbildung 4.21: *Das konzeptuelle Profil der Schüler: Zusammenfassung und Interpretationen*

Erhebungen	Unterrichtsabschnitte	Schwerpunkt der Unterrichtssequenz
	Wiederholungsphase	Der Lichtelektrische Effekt Wellenoptik
Vortest (VT) (28 Schüler)		Bearbeitung des Fragebogens
	1. Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang	Experimentelle Feinabstimmung MZ-Interferometer: Aufbau
	2. Unterrichtsfeld: Zielgerichtete Beobachtung	MZ-Interferometer: Justierung
	3. Unterrichtsfeld: Idealisierung	MZ-Interferometer: Idealisierung Wellenmodell des Lichts
	4. Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion	MZ-Interferometer: mit Photonen Interpretationen des Experimentes
Nachtest (NT) (28 Schüler)		Bearbeitung des Fragebogens

Tabelle 4.2: Die zweite Teil-Untersuchung: Unterrichtssequenz und Erhebung

4.4 Die zweite Teil-Untersuchung

Die Durchführung der Untersuchung erfolgte in zwei Berliner Gymnasien mit insgesamt 28 Schülern und Schülerinnen. In der Tabelle 4.2 sind der Verlauf der Unterrichtssequenz sowie die Platzierung der Tests im Hinblick auf die Unterrichtsfelder bzw. Unterrichtsschwerpunkte angegeben.

4.4.1 Der Fragebogen

Wie in der ersten Teil-Untersuchung ist das Hauptinstrument zur Erfassung des konzeptuellen Profils der Schüler auch in der zweiten Teil-Untersuchung ein Fragebogen, der am Anfang der Unterrichtssequenz und nach der Durchführung der Unterrichtsreihe eingesetzt wurde. Der Fragebogen wurde – wie in der ersten Teil-Untersuchung – auf Grund des im Abschnitt 4.2.1 dargestellten Kategoriensystems entwickelt. Er besteht aus drei Gruppen von Items (s. Anhang B: Fragebogen – 2. Teil-Untersuchung): Item-Gruppe Teilchen (Items 1.1 bis 1.4), Item-Gruppe Wellen (Items 2.1 bis 2.4) und Item-Gruppe Photonen (Items 3.1 bis 3.7). Die Item-Gruppen im Fragebogen entsprechen drei vorgestellten Problemsituationen, die sich jeweils auf die drei thematischen Untersuchungsfelder Teilchenbild, Wellenbild und Photonen beziehen.

Die Struktur der Items im Fragebogen im Hinblick auf die thematischen Felder und

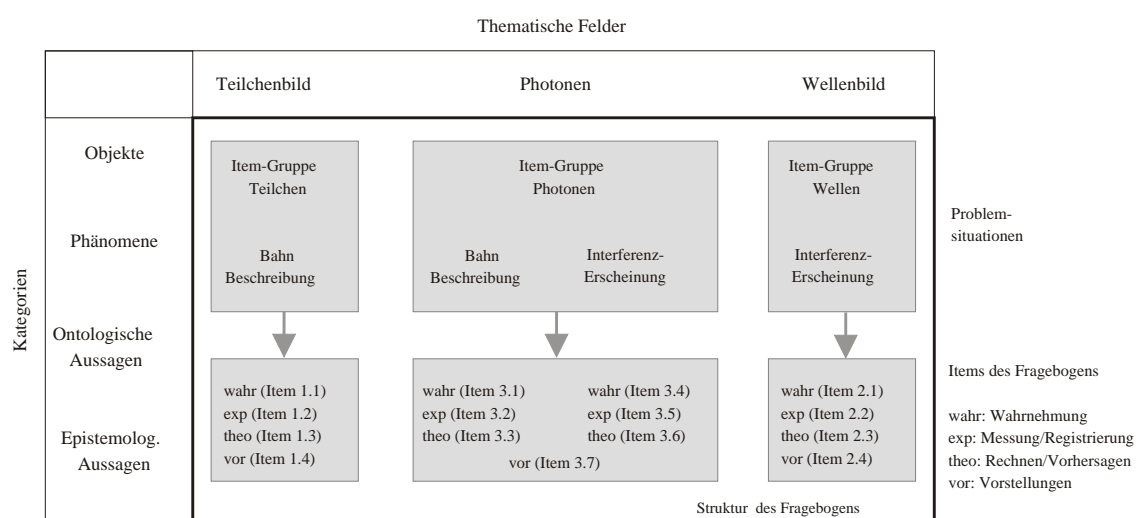
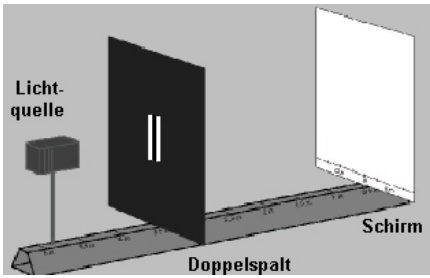


Abbildung 4.22: Die Struktur des Fragebogens im Hinblick auf die Untersuchungskategorien

auf die Untersuchungskategorien ist in der Abbildung 4.22, S. 128 vorgestellt.

Die in der Abbildung 4.22 vorgestellte Struktur ist mit Hilfe der Darstellungen in den Abbildungen 4.23 und 4.24 am konkreten Beispiel der Item-Gruppe Wellen näher erläutert. In der Darstellung der Abbildung 4.24 erkennt man die vier Items des Fragebogens (Items: 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4), die sich auf die vorgestellte Problemsituation für das Objekt Licht beziehen. Aus der Sicht der vorgestellten Problemsituation wird dann gefragt,

- ob die Interferenzerscheinung mit Sinnen wahrgenommen werden kann – Item 2.1: Wahrnehmung (wahr),
- ob die Interferenzerscheinung (mit Hilfe von Instrumenten) registriert werden kann – Item 2.2: Experimentelle Beweise (exp),
- ob die Interferenzerscheinung mit Hilfe von Aussagen aus der Theorie bestimmt werden kann – Item 2.3: Theoretische Beweise (theo) und
- wie sich das auf dem Schirm erscheinende Phänomen darstellen lässt – Item 2.4: Vorstellung (vor).

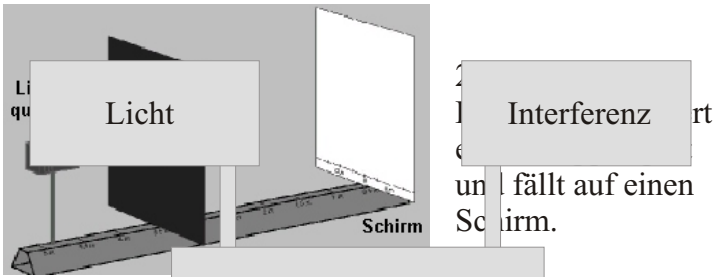


2. Das Licht einer Lichtquelle passiert einen Doppelspalt und fällt auf einen Schirm.

Der Doppelspalt besitzt eine viel kleinere Spaltbreite als hier dargestellt ist - etwa einige Zehntel Millimeter.

	trifft zu	trifft nicht zu	ich weiß nicht
2.1 Man kann Interferenzerscheinungen zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm mit bloßen Augen wahrnehmen.			
2.2 Man kann Interferenzmuster auf dem Schirm mit Hilfe von Photopapier prinzipiell registrieren.			
2.3 Mit Hilfe bestimmter mathematischer Funktionen kann man die Intensität des Lichtes für jede beliebige Position auf dem Schirm prinzipiell genau vorherbestimmen			
2.4 Skizzieren Sie bitte im Bild oben, was auf dem Schirm zu sehen ist. (Bitte markieren Sie in Ihrer Skizze die hellen bzw. dunklen Stellen).			

Abbildung 4.23: Items des Fragebogens am Beispiel der Item-Gruppe Wellenbild



2. Das Licht einer Lichtquelle passiert einen Doppelspalt und fällt auf einen Schirm.

Der Doppelspalt besitzt eine viel kleinere Spaltbreite als hier dargestellt ist.

	trifft zu	trifft nicht zu	ich weiß nicht
2.1 Man kann Interferenzerscheinungen zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm mit bloßen Augen wahrnehmen.			
2.2 Man kann Interferenzmuster auf dem Schirm mit Hilfe von Photopapier prinzipiell registrieren.			
2.3 Mit Hilfe bestimmter mathematischer Funktionen kann man die Intensität des Lichtes für jede beliebige Position auf dem Schirm prinzipiell genau vorherbestimmen			
2.4 Skizzieren Sie bitte im Bild oben, was auf dem Schirm zu sehen ist. (Bitte markieren Sie in Ihrer Skizze die hellen bzw. dunklen Stellen).			

Abbildung 4.24: Items des Fragebogens im Hinblick auf die Untersuchungskategorien

Die am Beispiel der Abbildung 4.24 vorgestellte Struktur, d.h. die Vorstellung einer Problemsituation entsprechend dem Objekt Licht und die Befragung hinsichtlich der Untersuchungskategorien Wahrnehmung, Experimentelle Beweise, Theoretische Beweise und Vorstellung, ist im Fragebogen analog dem Objekt Licht auch innerhalb der Item-Gruppe Teilchen und der Item-Gruppe Photonen zu erkennen (s. Fragebogen im Anhang B: Fragebogen – 2. Teil-Untersuchung: Items 1.1 bis 1.4 für Teilchen und Items 3.1 bis 3.7 für Photonen).

4.4.2 Analyse der Schülerantworten im Fragebogen

Die Analyse der Schülerantworten erfolgt unter Verwendung von nicht-parametrischen Testverfahren, denn nicht-parametrische Verfahren setzen weder eine Normalverteilung noch eine große Stichprobe voraus und können bei niedrigem Datenniveau (Nominal- bzw. Ordinaldaten) eingesetzt werden. Die im Rahmen dieser Untersuchung zu analysierenden Daten erfüllen diese Bedingungen. Die Schülerantworten im Fragebogen ($n = 28$) werden als dichotome Variablen mit dem Wert 1 für die Antworten “trifft zu” und mit dem Wert 0 für die übrigen Antworten (s. Fragebogen) codiert³.

Die im Vortest und Nachtest gegebenen Schülerantworten für die Items des Fragebogens werden innerhalb der Item-Gruppen (s. Abb. 4.25, S. 131; Vergleich innerhalb der Gruppe) und mit den entsprechenden Items anderer Item-Gruppen (s. Abb. 4.25; Vergleich außerhalb der Gruppe) verglichen.

Für die Analyse werden – wie bereits erwähnt wurde – insgesamt 28 Schüler aus zwei Gymnasien (20 Schüler aus Gymnasium M und 8 Schüler aus Gymnasium K) zusammen betrachtet. Der Unterschied zwischen den Schülern aus den zwei Gymnasien bezüglich der Häufigkeiten von Antworten “trifft zu” im Fragebogen lässt sich mit Hilfe des Fisher-Tests berechnen (s. Details im Anhang E: Vergleich Gymnasium M mit Gymnasium K). Der Fisher-Tests ergibt für fast alle Items des Fragebogens (Ausnahme: Item 3.2 im Vortest) Werte im Bereich über $p = 0,05$. Daher entscheiden wir, die beiden Gruppen von Schülern – Schüler aus dem Gymnasium M und Schüler aus dem Gymnasium K – nicht zu unterscheiden und für die vorhandene Analyse die beiden Gruppen zusammen zu betrachten.

³Ausschließend: Item 1.4 (1 = Darstellung der Bahn, 0 = andere oder keine Darstellung; Item 2.4 (1 = Darstellung eines Interferenzmusters mit hellen und dunklen Streifen, 0 = andere oder keine Darstellung und Item 3.4 (1 = Darstellung eines Interferenzmusters mit hellen und dunklen Streifen und keine Darstellung der Bahn, 0 = andere oder keine Darstellung).

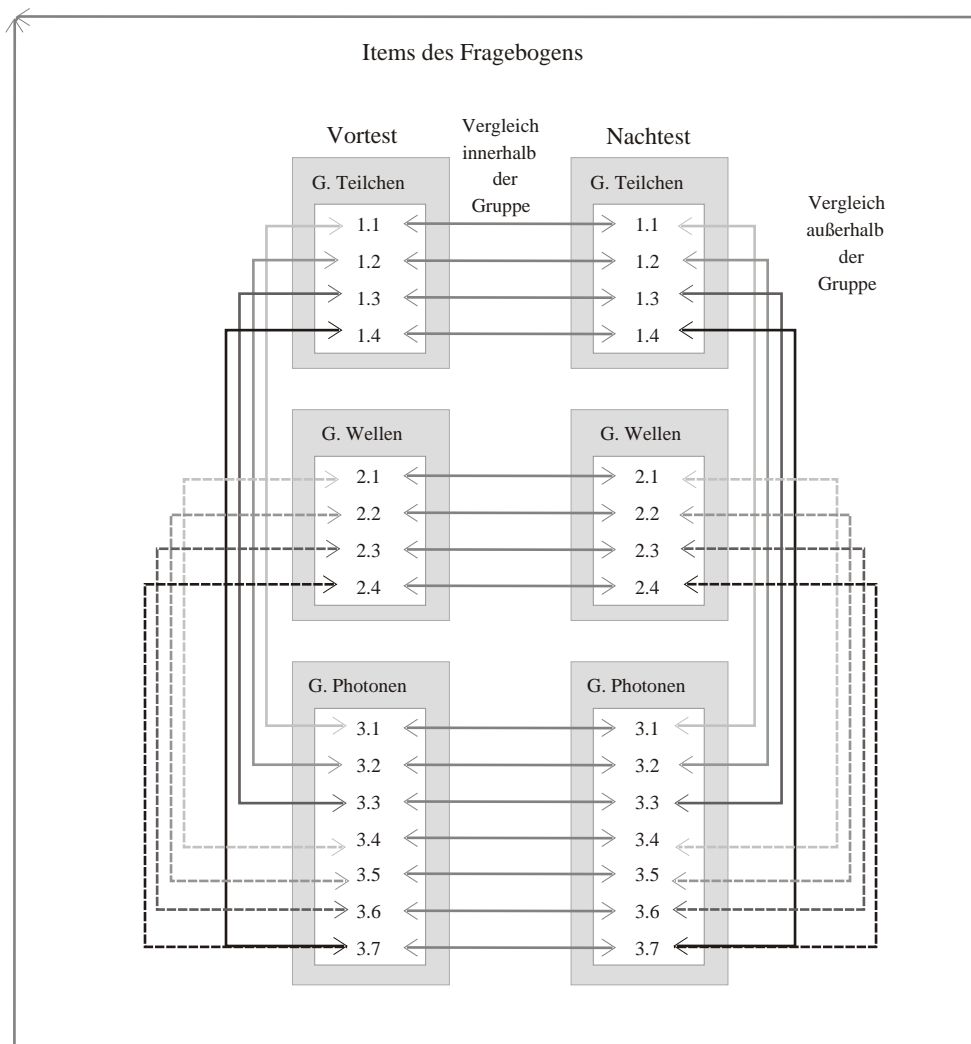


Abbildung 4.25: Das Verfahren der Analyse

Vergleiche zwischen Items innerhalb der Item-Gruppen

Beim Vergleich zwischen den Schülerantworten im Vortest mit den Schülerantworten im Nachtest aus der Sicht der einzelnen Items der Item-Gruppen wird der McNemar-Test⁴ als Test zur Prüfung auf Unterschiede zwischen den Häufigkeiten eingesetzt.

4.4.2.1 Schülerverhalten im thematischen Feld Teilchenbild

In der Abbildung 4.26, S. 133 (oben) sind die Häufigkeiten von Antworten “trifft zu” im Vortest und im Nachtest für die Items der Item-Gruppe Teilchen (s. Items 1.1 bis 1.4 im Fragebogen) sowie die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem McNemar-Test für die Prüfung der Unterschiede der Häufigkeiten dargestellt. In der Abbildung 4.26 (unten) werden die Veränderungen in den Schülerantworten beim Vergleich der Häufigkeiten im Vortest und im Nachtest zusammengefasst.

Eine Tendenz⁵ zur Annahme der Items 1.1 (wahr), 1.2 (exp) und 1.3 (theo) durch die Schüler und zur Darstellung einer angemessenen Bahn für die Kugel im Item 1.4 (vor) wird sowohl im Vortest als auch im Nachtest festgestellt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Antworten im Vortest und im Nachtest ist im Fall der Items der Item-Gruppe Teilchen nicht festzustellen.

Daraus lässt sich folgen, dass die Schüler bereits vor dem Unterricht angemessene Vorstellungen über die Teilchenbeschreibung besessen haben und dass daher kein Einfluss der Unterrichtssequenz auf die Schülervorstellungen zu erwarten war.

4.4.2.2 Schülerverhalten im Thematischen Feld Wellenbild

In ähnlicher Art wie für die Items der Item-Gruppe Teilchen sind die Häufigkeiten von Antworten “trifft zu”, die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem McNemar-Test für die Prüfung der Unterschiede der Häufigkeiten und die Veränderungen in den Schülerantworten beim Vergleich der Häufigkeiten im Vortest und im Nachtest für die Items der Item-Gruppe Wellen (Items 2.1 bis 2.4) in der Abbildung 4.27, S. 135 präsentiert.

Eine Tendenz zur Ablehnung des Items 2.1 (wahr) und zur Annahme des Items 2.2 (exp) wird sowohl im Vortest als auch im Nachtest festgestellt. Das Item 2.3 (theo) wird im Vortest von der Mehrheit der Schülern abgelehnt und im Nachtest von der Mehrheit der Schüler angenommen. Im Item 2.4 lässt sich im Vortest eine Tendenz zur Darstellung nicht angemessener Interferenzmuster und im Nachtest zur Darstellung angemessener Interferenzmuster beobachten. Die Tendenzen zu den höheren Häufigkeiten in den

⁴Der Test wurde mit SPSS – Statistic Package für Social Science – berechnet.

⁵Für die Beschreibung der Tendenzen wird der Modalwert eingesetzt.

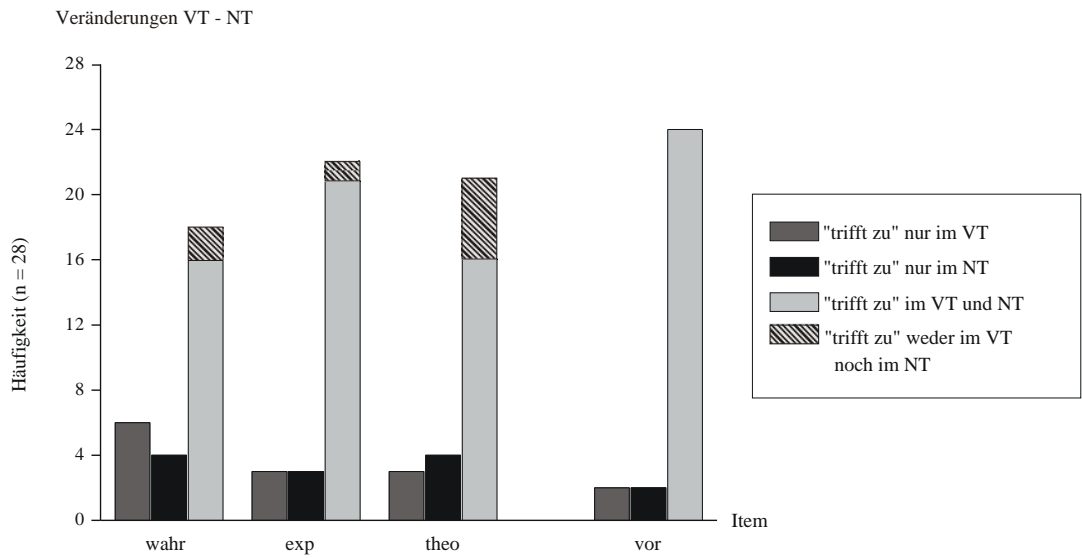
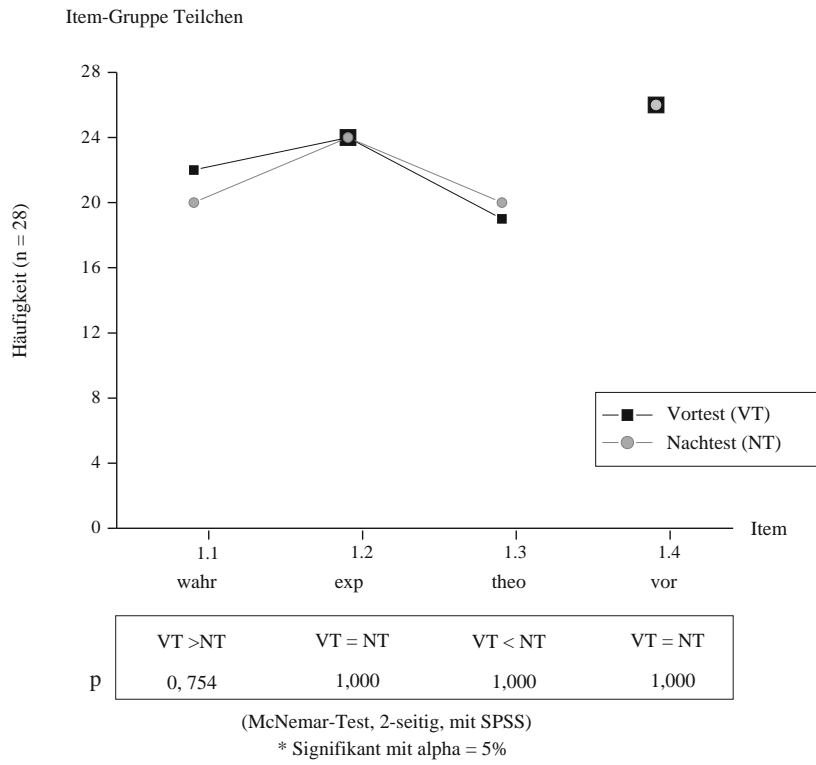


Abbildung 4.26: Items der Item-Gruppe Teilchen

Items 2.3 und 2.4 im Nachtest signalisieren positive Veränderungen in den Schülervorstellungen über das Wellenbild. Signifikante Unterschiede zwischen den Antworten im Vortest und Nachtest lassen sich dennoch im Fall der Items der Item-Gruppe Wellen nicht feststellen.

4.4.2.3 Das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen

So wie in den vorigen Abschnitten werden die Häufigkeiten von Antworten “trifft zu” im Vortest und im Nachtest für die Items der Item-Gruppe Photonen (Items 3.1 bis 3.7), die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem McNemar-Test für die Prüfung der Unterschiede der Häufigkeiten und die Veränderungen in den Schülerantworten beim Vergleich der Häufigkeiten im Vortest und im Nachtest in der Abbildung 4.28, S. 136 zusammengefasst.

Abgesehen von dem Item 3.3 (theo(T)) – in dem keine eindeutige Tendenz im Vortest beobachtet wird – und von dem Item 3.5 (exp(W)) – in dem sowohl im Vortest als auch im Nachtest eine Tendenz zur Annahme des Items beobachtet wird – lässt sich bei allen Items der Item-Gruppe Photonen eine Tendenz zur Ablehnung der Items sowohl im Vortest als auch im Nachtest feststellen. Im Item 3.7 zeigt sich bei den Schülern weder im Vortest noch im Nachtest eine Tendenz zu erwünschten Darstellungen. Signifikante Unterschiede zwischen den Schülerantworten im Vortest und im Nachtest sind im Fall der Items der Item-Gruppe Photonen nicht festzustellen.

Durch die Beobachtung von Veränderungen in dem Schülerverhalten beim Vergleich zwischen Vortest und Nachtest könnten Informationen über die Entwicklung der Schülervorstellungen über die Quantenentitäten bezüglich der Vorstellung der Welle-Teilchen Problematik gewonnen werden. Beispielsweise: Die Beobachtung einer höheren/niedrigeren Häufigkeit im Nachtest als im Vortest im Item 3.3 könnte signalisieren, dass die Schüler – nach der Auseinandersetzung mit dem Verhalten von Photonen im Hinblick auf das Verhalten von Teilchen und Wellen – beispielsweise eine “trajectory-based” (s. [Mannila et al. 2002], S. 49) Vorstellung für Photonen entwickelt/abgelehnt haben. Dies lässt sich im Fall der vorliegenden explorativen Studie nicht eindeutig feststellen, denn es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Vortest und Nachtest beobachtet.

Da in Items der Item-Gruppen Teilchen und Wellen auch keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich Vortest und Nachtest festgestellt wurden, lässt sich nicht eindeutig interpretieren, ob die Schülervorstellungen über Photonen stabil sind, ob der Unterricht wenig auf die Schülervorstellungen wirkt oder ob sich die Schülervorstellungen mit Hilfe des eingesetzten Fragebogens nicht in den erwünschten Dimensionen der Untersuchung erfassen lassen.

Für weitere Interpretationen der Schülervorstellungen über Photonen werden nun

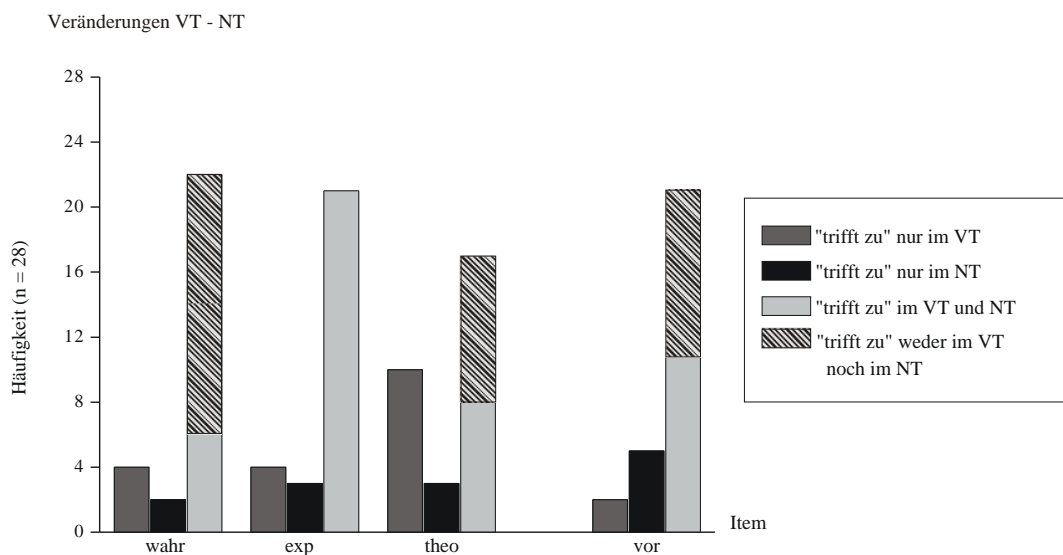
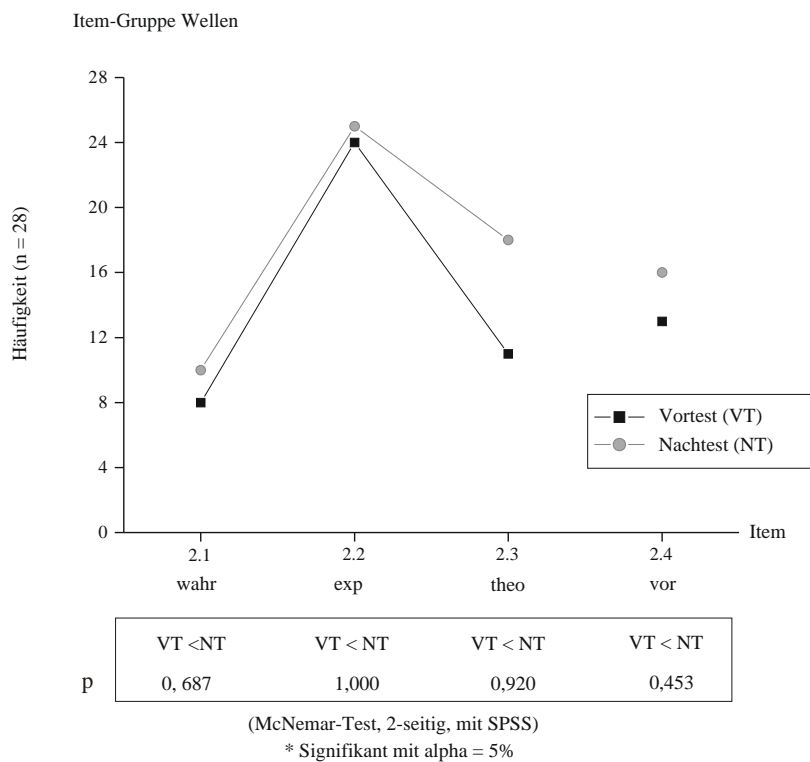


Abbildung 4.27: Items der Item-Gruppe Wellen

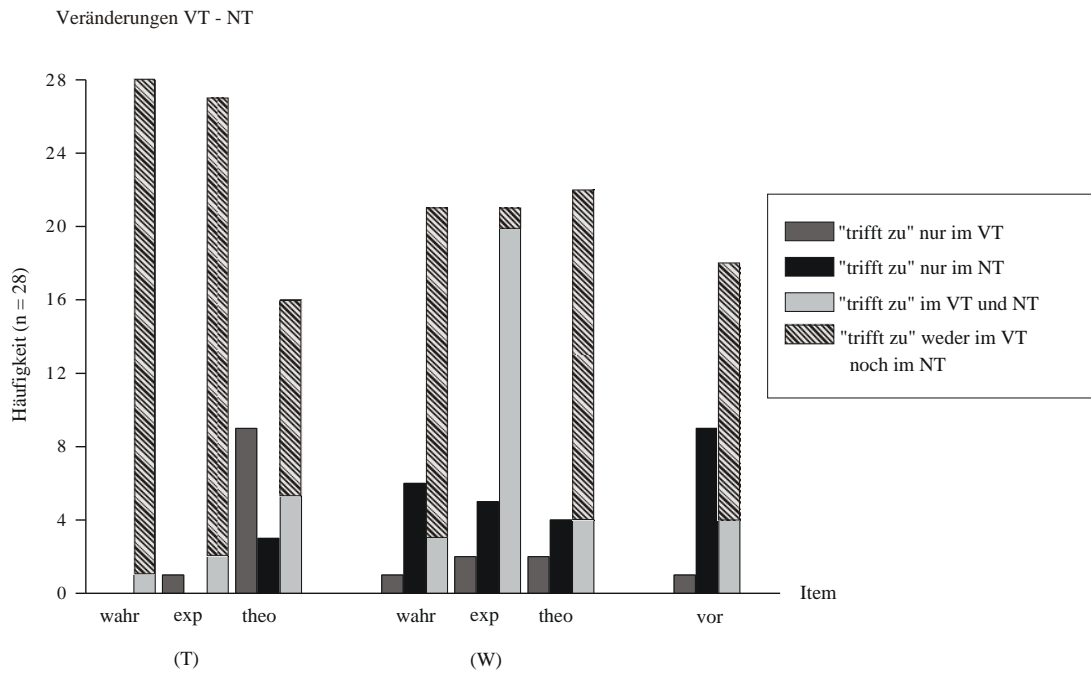
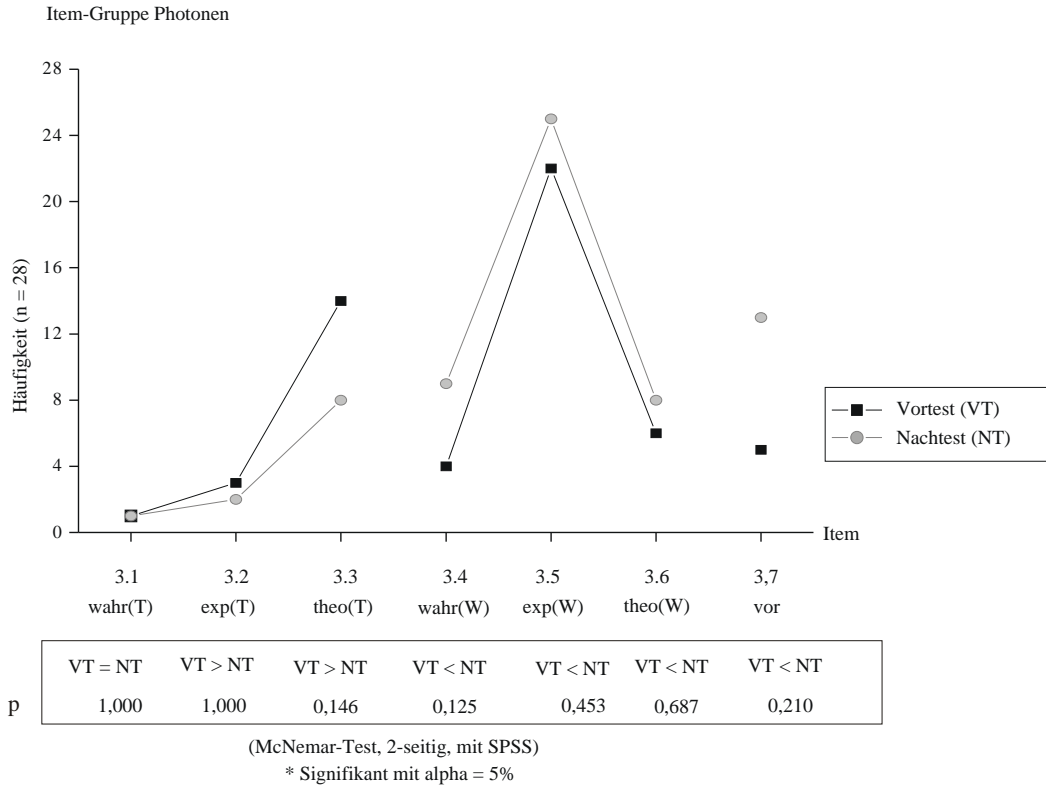


Abbildung 4.28: Items der Item-Gruppe Photonen

die Antworten der Schüler aus einer anderen Dimension – mit Hilfe von Paarbildungen aus den Items der Gruppen Photonen und Teilchen bzw. Photonen und Wellen – betrachtet.

Vergleiche zwischen Items der Gruppen: Photonen-Teilchen bzw. Photonen-Wellen

Aufgrund der inhaltlichen Struktur der Items im Fragebogen (s. Abb. 4.22, S. 128) werden die Items der Item-Gruppe Photonen mit den Items der Item-Gruppe Teilchen bzw. der Item-Gruppe Wellen folgendermaßen verglichen:

Vergleiche zwischen Item-Gruppen: Photonen und Teilchen	Vergleich zwischen Item-Gruppen: Photonen und Wellen
Items (wahr)(T): 3.1 und 1.1	Items (wahr)(W): 3.4 und 2.1
Items (exp)(T): 3.2 und 1.2	Items (exp)(W): 3.5 und 2.2
Items (theo)(T): 3.3 und 1.3	Items (theo)(W): 3.6 und 2.3

In den Abbildungen 4.29, S. 138 und 4.30, S. 139 werden die Häufigkeiten von Antworten “trifft zu” im Vortest und im Nachtest für die Items der Item-Gruppen Photonen und Teilchen bzw. Photonen und Wellen noch einmal zusammengefasst und die Ergebnisse aus der Berechnung mit dem McNemar-Test zur Prüfung auf Unterschiede der Häufigkeiten und aus der Berechnung der Korrelationskoeffizienten zur Erfassung von Zusammenhängen zwischen dem Verhalten der Schüler bezüglich der entsprechenden Items präsentiert.

Bereits bei einem oberflächlichen Blick auf die Darstellungen der Abbildungen 4.29 und 4.30 erkennt man generelle Ähnlichkeiten und positive Zusammenhänge zwischen dem Schülerverhalten in der Item-Gruppe Photonen und in der Item-Gruppe Wellen; und generelle Unterschiede und negative Zusammenhänge zwischen dem Schülerverhalten in der Item-Gruppe Photonen und in der Item-Gruppe Teilchen.

Abgesehen von dem Paar (theo)(T) (Item 3.3 – Item 1.3) im Vortest, in dem kein signifikanter Unterschied beobachtet wird, lässt sich bei allen anderen Paaren: Photonen-Teilchen sowohl im Vortest als auch im Nachtest ein signifikanter Unterschied feststellen. Dieses Ergebnis kann folgendes signalisieren: a) Die ursprünglichen Schülervorstellungen über das Verhalten von Photonen unterscheiden sich von ihren Vorstellungen über das Verhalten von Teilchen. b) Es lässt sich aufgrund der Betrachtung der Welle-Teilchen-Problematik im Unterricht keine direkte Assoziation zwischen den Schülervorstellungen über das Verhalten von Photonen und der Teilchen-Beschreibung feststellen. Die Beobachtung eines signifikanten Unterschiedes bei dem Paar: Item 3.3 – Item 1.3 im Nachtest ist ein Indiz dafür, dass die Schüler nach dem Unterricht den Unterschied zwischen dem Verhalten von Photonen und Teilchen auch auf einer formalen Ebene (der mathematischen Beschreibung) erfassen können. Die oben erwähnten Ergebnisse wider-

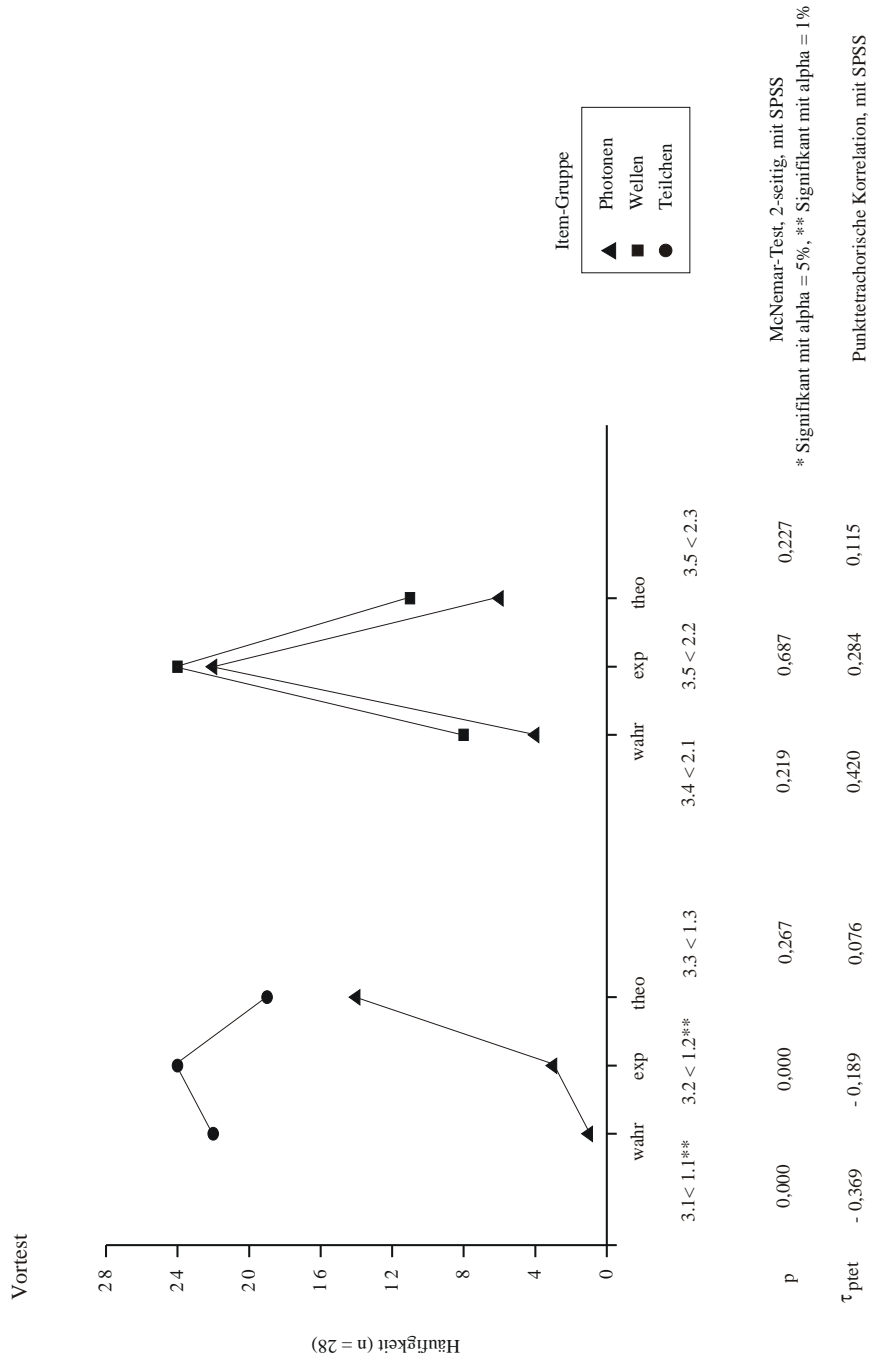


Abbildung 4.29: Vergleich der Items außerhalb der Item-Gruppen (Vortest)

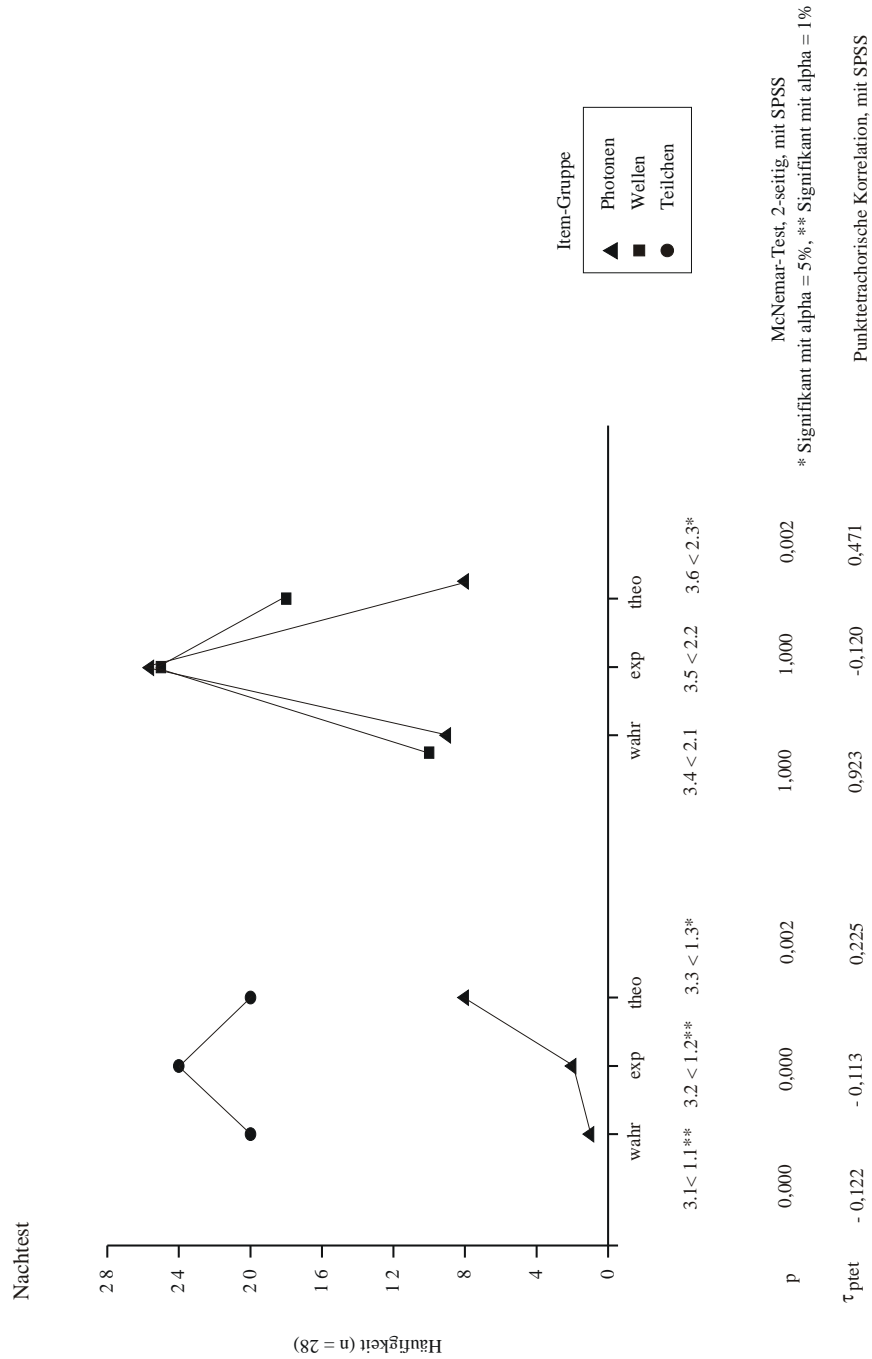


Abbildung 4.30: Vergleich der Items außerhalb der Item-Gruppen (Nachtest)

Items		wahr		exp		theo		vor	
		Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest	Vortest	Nachtest
Item-Gruppen									
Weginformation	Teilchen	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	+	+
	Photonen	Nein	Nein	Nein	Nein	?	Nein	-	-
Interferenzerscheinung	Wellen	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	-	+
	Photonen	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	-	-

■ Signifikante Unterschiede

Abbildung 4.31: *Das konzeptuelle Profil der Schüler*

sprechen jedoch Ergebnissen anderer Untersuchungen (s. zum Beispiel [Fischler 1992] und [Lichtfeldt 1992]), in denen beispielsweise bezüglich des Doppelspaltexperimentes gezeigt wurde, dass die Schüler auf einer konzeptuellen Ebene die Quantenentitäten vorzugsweise mit Eigenschaften der Teilchen-Beschreibung assoziiert haben.

Was den Vergleich Photonen – Wellen anbetrifft, sind bei den Paaren: Item 3.4 – Item 2.1 (wahr)(W) und Item 3.5 – Item 2.2 (exp)(W) weder im Vortest noch im Nachtest signifikante Unterschiede zu beobachten. Die Items 3.6 – 2.3 (theo)(W) hingegen unterscheiden sich im Nachtest signifikant. Diese Ergebnisse signalisieren, dass die Schüler einerseits einen Zusammenhang zwischen dem Verhalten von Photonen und Wellen erkennen (s. Item-Paar: Item 3.5 und Item 2.2), andererseits das Verhalten von Photonen nicht allgemein mit der Wellen-Beschreibung assoziieren (s. Item-Paar: Item 3.6 und Item 2.3). Möglicherweise spielen in diesem Zusammenhang die “statistischen” (mit Bezug auf Teilchen) Vorstellungen über Photonen bei dem Schülerverhalten eine Rolle. Da jedoch in den Items 2.4 und 3.7 (vor) auch keine größeren Häufigkeiten beobachtet wurden, kann man nicht eindeutig sagen, ob die Schüler ein Interferenzmuster für Photonen – oder überhaupt ein Interferenzmuster im Zusammenhang mit einem Interferenzexperiment – darstellen können.

Bemerkungen zur zweiten Teil-Untersuchung

In der Tabelle der Abbildung 4.31, S.140 wird das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen zusammengefasst.

Die im Nachtest beobachteten Veränderungen (s. Items (theo) in der Tabelle) signalisieren, dass die Schüler Begrenzungen in der Teilchen-Beschreibung bzw. in der Wellen-Beschreibung für die Beschreibung des Verhaltens von Photonen wahrgenommen haben. Der Aussage über die Bestimmung der Weginformation wird für Teilchen – wie im Vortest – angenommen und für Photonen – im Gegensatz zum Vortest – abgelehnt. Die Bestimmung des Interferenzmusters wird für Wellen – im Gegensatz zum Vortest – angenommen, und für Photonen – so wie im Vortest – weiter abgelehnt. Daher vermuten wir, dass die Betrachtung des Verhaltens von Photonen im Hinblick auf das Verhalten von Teilchen und Wellen aus einer epistemologischen Perspektive möglicherweise dazu beiträgt, dass die Schüler die Beschränkungen in der (klassischen) Teilchen-Beschreibung bzw. Wellen-Beschreibung für Photonen wahrnehmen und dass sie daher Photonen mit Teilchen bzw. mit Wellen nicht direkt assoziieren. Dieses Ergebnis ist aus der Sicht des Unterrichtskonzepts positiv einzuschätzen und stimmt mit den Ergebnissen in der ersten Teil-Untersuchung überein.

