

## Mehrdimensionale Analyse zur Vernetzung von Begriffselementen des Basiskonzepts Energie

Dennis Dietz\*, Claus Bolte\*

\*Freie Universität Berlin, Didaktik der Chemie, Haderslebener Straße 9, 12163 Berlin  
dennis.dietz@fu-berlin.de, claus.bolte@fu-berlin.de

### Kurzfassung

Als Reaktion auf die enttäuschenden Ergebnisse in den zurückliegenden TIMS- (Baumert et al., 1997) und PISA-Studien (Baumert et al., 2001; Prenzel et al., 2004) wurden Basiskonzepte, wie das fächerübergreifende Energiekonzept, in den deutschen Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss verankert (KMK, 2005a-c). Damit war die Hoffnung verbunden, die nach der konstruktivistischen Lerntheorie und den Leitlinien des kumulativen Lernens wichtige Vernetzung von Unterrichtsinhalten zu forcieren. In der vorliegenden Arbeit gehen wir der Frage nach, inwieweit wir in von Schüler\*innen der Jahrgangsstufe 9 formulierten Essays zum Basiskonzept Energie vertikale (fachimmanente) und horizontale (fächerübergreifende) Vernetzungsstrukturen nachweisen können. Da die uns bekannten Modelle und Ansätze zur Analyse und Beschreibung von Vernetzungsleistungen entweder ausschließlich auf den Aspekt der vertikalen Vernetzung oder ausschließlich auf den Aspekt der horizontalen Vernetzung fokussieren, haben wir auf der Basis dieser Modelle und Ansätze ein weiter ausdifferenziertes Analyseinstrument entwickelt, das neben der vertikalen Vernetzung ebenso der Dimension der horizontalen Vernetzung Rechnung trägt. Mit dem eigens entwickelten Modell zur Analyse der Vernetzung von Begriffselementen in Essays (MAVerBE) haben wir 132 Essays zum Energiekonzept von Schüler\*innen eines Gymnasiums untersucht. In diesem Beitrag stellen wir ausgewählte Analyseergebnisse zur Diskussion.

### 1. Ausgangslage

Die wenig zufriedenstellenden Ergebnisse Deutschlands in der ersten TIMS-Studie interpretierten Baumert et al. (1997, S.146) dahingehend, dass eine zu geringe vertikale Vernetzung des naturwissenschaftlichen Unterrichts die Ursache für den geringen Lernzuwachs der Schüler\*innen sei. Unter vertikaler Vernetzung wird die fachimmanente Vernetzung von Wissen verstanden (Fischer et al., 2007, S.662). Konsequenterweise forderte die Bund-Länder-Kommission im gleichen Jahr, dass es mehr vertikale und darüber hinaus auch mehr horizontale Vernetzung im Unterricht geben müsse (BLK, 1997, S.45). Horizontale Vernetzung bezeichnet dabei die fächerübergreifende Vernetzung von Unterrichtsinhalten (Fischer et al., 2007, S.662). Um diesen geforderten Zuwachs an vertikaler und horizontaler Vernetzung zu ermöglichen, wurden im Jahr 2005 Basiskonzepte in den Bildungsstandards des mittleren Schulabschlusses verankert (Demuth et al., 2005; KMK, 2005a-c). Wie es um die Vernetzungsleistungen der Schüler\*innen innerhalb dieser Basiskonzepte aber bestellt ist, erscheint uns aktuell eine empirisch noch weitgehend ungeklärte Frage zu sein.

### 2. Theorie

#### 2.1 Die Vernetzung von Begriffen im menschlichen Wissen

Das begriffliche Wissen stellt einen wesentlichen Bestandteil des menschlichen Wissens dar (Aebli, 1981). Die Fähigkeit des kognitiven Systems, Begriffe als mentale Repräsentationen von zentralen erlebten Tendenzen oder Invarianzen zu bilden, ist eine

erste Voraussetzung dafür, dass der Mensch die quasi unendlich vielfältigen Situationen, die in der Interaktion mit seiner Umwelt entstehen, bewältigen kann (Schnotz, 1994, S.27). Aebli (2003, S.245) stellt diesbezüglich fest, dass die Bildung eines Begriffs bedeutet, „eine Erscheinung im Griff“ zu haben.

Eine zweite, für den Menschen im Umgang mit der komplexen Umwelt, wesentliche Fähigkeit des kognitiven Systems besteht nach Miller (1956) sowie Laird, Rosenbloom und Newell (1986) darin, Informationen zu sogenannten „chunks“ zusammenzufassen und als Einheiten zu verwenden. Diese Einheiten können entsprechend Aebli (1980, S.43 in Anlehnung an Selz, 1913; 1922) und Schnotz (1994, S.30) zu höheren Einheiten miteinander verknüpft werden. Aebli (1981, S.103f.) bezeichnet diesen Vorgang während der Begriffsbildung als Objektivierung, bei der verknüpfte Begriffe zu Ketten verdichtet und auf diese Weise zu Objekten höherer Ordnung werden, die wiederum miteinander zu Netzen verknüpft werden können.

Nach dem Prinzip der kognitiven Ökonomie werden also Begriffe gebildet, welche zu Einheiten unterschiedlicher Ordnung zusammengefasst werden können. Auf diese Weise kommt es innerhalb des begrifflichen Wissens zur Ausbildung von Komplexions- und Abstraktionshierarchien (Schnotz, 1994, S.30 in Anlehnung an Dörner, 1976). Eine Komplexion bezeichnet Teile, die in einer bestimmten raum-zeitlichen Ordnung miteinander verknüpft sind und so ein Ganzes bilden (Dörner, 1976, S.33). Räumliche Verknüpfungen sind häufig Substantive und an Formulierungen wie „hat als Teil“ zu erkennen. Zeitliche

Relationen sind häufig Verben, mit denen Prozesse beschrieben werden können. Kausale Zusammenhänge werden als raum-zeitliche Relationen aufgefasst (Dörner, 1976, S.33). Begriffliche Komplexionshierarchien können auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen gebildet werden. Zunehmend abstrakte Begriffe sind an einer abnehmenden Anzahl der sie konstituierenden Merkmale und an einer erweiterten Anzahl an Exemplaren erkennbar, die unter den jeweiligen abstrakten Begriff subsummiert werden (Achtenhagen et al., 1992, S.97f.). Den Aufbau des begrifflichen Wissens nehmen Strukturalisten wie Aebli (1980; 1981) und Schnotz (1994) also als propositionales Netzwerk an. Jeder Begriff beinhaltet zahlreiche Begriffselemente, die auf unterschiedliche Art und Weise miteinander verknüpft sind (Aebli, 2003).

Aebli (1981, S.206f.) ergänzt die Aussagen von Dörner (1976) zur hierarchischen Struktur des begrifflichen Wissens dahingehend, dass diese Hierarchien nur situativ und damit temporär ausgebildet werden. Im Zuge der Rekonstruktion eines Begriffs blickt der Mensch innerhalb seines begrifflichen Netzes von einem bestimmten Punkt aus auf die Relationen zwischen den vernetzten Begriffselementen. Dieser Blick in das Netz des begrifflichen Wissens wird von Aebli (1981, S.206) auch als Perspektivbildung bezeichnet. Da dabei zunächst die vom Perspektivpunkt ausgehenden Relationen betrachtet werden, wird hierbei temporär die hierarchische Struktur eines Begriffs erkennbar, die im Zuge der Begriffsbildung, z.B. durch das Folgen einer Erklärung, aufgebaut wurde (Aebli, 1981, S.206f.). Diese Form der Hierarchisierung wird jedoch im Anschluss an die Perspektivbildung wieder aufgehoben. Wird die Perspektivbildung desselben Sachverhalts von einem anderen Standpunkt aus betrachtet, wird der Sachverhalt ausgehend von einem anderen Knoten des Begriffsnetzes rekonstruiert (Aebli, 1981, S.207); die flexible Nutzung von begrifflichen Elementen wird so geübt. In einem erfolgreich vernetzten Wissen ist ein aktives Zugreifen auf die einzelnen begrifflichen Elemente – also eine vielfältige und flexible Perspektivbildung – möglich. Die Bedeutung der möglichst vielfältigen Vernetzung von Begriffselementen zu Begriffen sowie von Begriffen untereinander für das Lernen spiegelt sich in allen bedeutsamen Lerntheorien wider.

Gagné, der als Begründer der Theorie des kumulativen Lernens gilt, nannte eine von acht aufeinander aufbauenden Lernarten das „Regellernen“. Beim „Regellernen“ werden Begriffe, die im vorherigen Lerntypen erworben wurden, zu Ketten miteinander verknüpft werden (Gagné, 1970, S.52). Mandl (2006, S.29) stellt im Zusammenhang mit den Grundzügen der konstruktivistischen Lerntheorie fest: „Neues Wissen kann nur erworben und genutzt werden, wenn es in die vorhandenen Wissensstrukturen eingebaut [...] wird.“ Die durch den Einbau des neuen Wissens in bestehende Wissensstrukturen entstehende Vernetzung gilt als ein Qualitätsmerkmal von Wissen (siehe

auch de Jong & Ferguson-Hessler, 1996). Zur Beschreibung der Qualität des vernetzten Lernens sind verschiedene Modelle bzw. Ansätze bekannt, die wir in der gebotenen Kürze in den folgenden beiden Unterkapiteln vorstellen werden.

## 2.2 Modelle zur Beschreibung vertikaler Vernetzungsleistungen

Das Modell der vertikalen Vernetzung von Fischer, Glemnitz, Kauertz und Sumfleth (2007) unterscheidet zwischen den Vernetzungsaktivitäten Erinnern, Strukturieren und Elaborieren. Diese kognitiven Aktivitäten finden wiederum auf verschiedenen Vernetzungsniveaus statt. Als hierarchisch angeordnete Vernetzungsniveaus nutzt das Modell von Fischer et al. (2007) den *Fakt*, *mehrere Fakten*, *einen Zusammenhang*, *unverbundene Zusammenhänge*, *verbundene Zusammenhänge* sowie *das übergeordnete Konzept*. Mit Hilfe des Modells der vertikalen Vernetzung wurden bereits Vernetzungsleistungen in videographiertem Unterricht vielfältig untersucht (u.a. Neumann et al., 2008; Wadouh et al., 2009) oder auch Testaufgaben zur Leistungsbestimmung entwickelt (Kauertz, 2007; Ropohl, 2010). Kauertz (2007, S.111) stellte im Zuge seiner empirischen Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Aufgabenschwierigkeit und dem in der Aufgabe geforderten Vernetzungsniveau fest, dass sich die Niveaus tendenziell in der Reihenfolge *Fakt*, *Zusammenhang*, *mehrere Fakten*, *verbundene Zusammenhänge*, *übergeordnetes Konzept* sowie *unverbundene Zusammenhänge* ordnen ließen. Obgleich diese von Kauertz (2007) ermittelte Reihenfolge statistisch nicht vollständig abgesichert werden konnte, scheint die Anzahl der zu verknüpfenden Elemente neben der Qualität der Vernetzung als Schwierigkeitserzeugendes Merkmal für die Schüler\*innen als erwiesen. Auch Ropohl (2010, S.117) plädiert dafür, dass es sinnvoll ist, zwischen dem Fakten-, dem Zusammenhangs- und dem Konzeptniveau qualitativ zu unterscheiden. Aus diesen Gründen wird das Modell der vertikalen Vernetzung für die Komplexitätsdimension in den Kompetenzstrukturmodellen des ESNaS-Projektes, wengleich in etwas abgewandelter Form, verwendet (u.a. Kauertz et al., 2010). Um die Anzahl der zu verknüpfenden Elemente angemessen zu berücksichtigen, werden im ESNaS-Projekt die Vernetzungsniveaus *1 Fakt*, *2 Fakten*, *1 Zusammenhang*, *2 Zusammenhänge* und *das übergeordnete Konzept* unterschieden (u.a. Kauertz et al., 2010).

Bernholt, Parchmann & Commons adaptierten das Modell der hierarchischen Komplexität (2009) für den Chemieunterricht und begründeten so das MHC-C („C“ steht im MHC-C für Chemie). Die Autor\*innen orientieren sich an den hierarchisch zunehmend komplexen Operationsniveaus *primary*, *concrete*, *abstract*, *formal* und *systematic* des von Commons et al. (1998) entwickelten Modells der hierarchischen Komplexität (MHC). Das MHC basiert auf logisch-mathematischen Prinzipien und ist inhaltsunabhängig anwendbar. Das adaptierte MHC-C berücksichtigt die

Vernetzungsniveaus *unreflektiertes Erfahrungswissen, Fakten, Prozessbeschreibung, lineare Kausalität* sowie die *multivariate Interdependenz*. Nachdem Bernholt (2010) das MHC-C zur Kompetenzmodellierung im Bereich Fachwissen für das Fach Chemie vorgestellt hat, wurde das MHC-C im weiteren Verlauf als Grundlage für die Komplexitätsdimension in Kompetenzstrukturmodellen (u.a. Woitkowski et al., 2011) und auch für die Analyse von Vernetzungsleistungen in videographiertem Unterricht (Podschuweit et al., 2016) verwendet.

Ropohl (2010, S.117) stellt heraus, dass es zwischen dem Modell der vertikalen Vernetzung von Fischer et al. (2007) mit seiner qualitativen Unterscheidung des Fakten-, Zusammenhangs- und Konzeptniveaus große Überschneidungen mit dem von Bernholt et al. (2009) adaptierten Modell der hierarchischen Komplexität gibt. Woitkowski, Riese und Reinhold (2011, S.297) stellen die theoretischen Überschneidungen der Kategoriendefinitionen dieser beiden Modelle graphisch übersichtlich dar. Den forschungspraktischen Vergleich der beiden Modelle legen Nehring, Päßler und Tiemann (2017) vor, indem sie beide Modelle auf die Untersuchung der Komplexität von Lehrerfragen im Chemieunterricht anwenden. Dabei stellen die Autoren fest, dass beide Modelle zu knapp 70 % vergleichbare Ergebnisse liefern (Nehring et al., 2017). Unterschiede zeigen sich insbesondere bei den Kombinationen *1 Fakt/Prozessbeschreibung* sowie *1 Zusammenhang/Fakten*. Außerdem weisen die Autoren nach, dass das nur selten auftretende höchste Vernetzungsniveau *übergeordnetes Konzept* nicht ein einziges Mal als *multivariate Interdependenz* kodiert werden konnte (Nehring et al., 2017). Da die beiden Modelle nicht vollständig vergleichbare Ergebnisse liefern, empfehlen Nehring et al. (2017, S.248), je nach Fragestellung z.B. für formale Analysen das Modell der vertikalen Vernetzung zu nutzen und für die Analyse des Charakters der begrifflichen Verbindungen das adaptierte Modell der hierarchischen Komplexität zu verwenden. Unseres Erachtens sprechen die Ergebnisse von Nehring et al. (2017) für die Notwendigkeit, auf Grundlage des Modells der vertikalen Vernetzung von Fischer et al. (2007) und des Modells der hierarchischen Komplexität von Bernholt et al. (2009) einen eigenen Ansatz zur Untersuchung der vertikalen Vernetzungsdimension zu entwickeln. Diesen Ansatz werden wir im Kapitel 4.2 begründend vorstellen.

### 2.3 Ein Ansatz zur Beschreibung horizontaler Vernetzungsleistungen

Lewing und Schneider (2019) haben einen weiteren richtungsweisenden Ansatz entwickelt. Mit Hilfe ihres Verfahrens können horizontale Vernetzungsstrukturen computerbasiert in Schulbüchern untersucht werden. Der Frage nachgehend, inwieweit in Schulbüchern für einen integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht eine stärkere horizontale Vernetzung zentraler Begriffe zu beobachten ist als in

Schulbüchern für einen fächerdifferenzierten Unterricht, führen sie sogenannte Kookkurrenzanalysen durch (Lewing & Schneider, 2019). Zwei Begriffe sind ihrer Definition entsprechend kookkurrent, wenn sie in zwei angrenzenden Sätzen gemeinsam auftreten (Lewing & Schneider, 2019, S.724). Um nun die horizontale Vernetzung dieser kookkurrenten Begriffe beschreiben zu können, suchen sie in Anlehnung an die Sachstrukturanalysen von Härtig (2010) nach dem Vorhandensein dieser Begriffe in Schulbüchern einzelner naturwissenschaftlicher Unterrichtsfächer, um sie letztendlich einem "klassischen" Unterrichtsfach (Biologie, Chemie oder Physik) oder einer Kombination von Unterrichtsfächern (Biologie/Chemie, Biologie/Physik, usw.) zuordnen zu können.

Wir werden - wie bereits erwähnt - im Kapitel 4.2 ein weiter elaboriertes Modell vorstellen, das die in diesem Kapitel dargestellten Modelle zur Beschreibung vertikaler oder horizontaler Vernetzungsleistungen zu einem funktionalen Modell vereint. Mit Hilfe dieses Modells können Vernetzungsleistungen von Schüler\*innen umfassend und multidimensional untersucht werden. Unter Zuhilfenahme des Modells haben wir versucht, der im folgenden Kapitel beschriebenen Fragestellung ersten Antworten zuzuführen.

### 3. Fragestellung

Das in den Standards für den mittleren Schulabschluss implementierte Energiekonzept ist das einzige Basiskonzept, das in allen drei naturwissenschaftlichen Fächern Biologie, Chemie und Physik von Bedeutung ist (KMK, 2005a-c). Da die Basiskonzepte mit dem Ziel eingeführt wurden, mehr vertikale und horizontale Vernetzung zu erreichen (Demuth et al., 2005), eignet sich dieses Basiskonzept u.E. in besonderem Maße dafür, sowohl die vertikalen als auch die horizontalen Vernetzungsleistungen der Schüler\*innen zu untersuchen. Wir gehen daher der folgenden Forschungsfrage nach: *In welchem Maße lassen sich in Schüler\*innen-Äußerungen zum Basiskonzept Energie vertikale und horizontale Vernetzungsstrukturen nachweisen?*

### 4. Methode

#### 4.1 Das Analyseinstrument

Mit den Methoden *Wortassoziationen, lautes Denken, Interviews, Concept Mapping* sowie *Essays* existieren viele unterschiedliche methodische Ansätze, um einen Einblick in die kognitiven Strukturen von Schüler\*innen zu gewinnen (u.a. Stewart, 1980). Mit Blick auf das übergeordnete Ziel unseres Forschungsvorhabens (siehe Kapitel 7 Ausblick) haben wir uns dazu entschieden, die Schüler\*innen zu Beginn der Jahrgangsstufe 9 *Essays* zum Thema Energie schreiben zu lassen. Diese Methode bietet den Vorteil, dass kein zusätzliches Methodentraining für die Schüler\*innen notwendig ist. Zudem kann eine größere Anzahl an Schüler\*innen, in unserem Fall eine gesamte Jahrgangsstufe, unter Beachtung ökonomischer Rahmenbedingungen untersucht werden.

<i>endotherm</i>	<i>kinetische Energie</i>	<i>Stoffwechsel</i>	<i>Energieform</i>
<i>System</i>	<i>Fotosynthese</i>	<i>Reaktionsenergie</i>	<i>Arbeit</i>
<i>Energiefluss</i>	<i>chemische Energie</i>	<i>elektrische Energie</i>	<i>Ernährung</i>
<i>chemische Reaktion</i>	<i>Energieumwandlung</i>	<i>Teilchen</i>	<i>potenzielle Energie</i>
<i>Zellatmung</i>	<i>Aktivierungsenergie</i>	<i>Wärme</i>	<i>Licht</i>
<i>Energieerhaltung</i>	<i>Mitochondrium</i>	<i>exotherm</i>	<i>Bewegung</i>
	<i>Energiegehalt</i>	<i>Temperatur</i>	

Nun bist du an der Reihe. Versetze dich in Pauls und Mias Situation, die nun gemeinsam einen Text zum Thema **Energie** schreiben wollen.

1. Markiere zuerst die Begriffe in dem Kasten (oben), die du für deinen Text zum Thema **Energie** verwenden willst.

2. Wenn dir weitere Begriffe zum Thema **Energie** einfallen, die du für deinen Text zum Thema **Energie** verwenden willst, dann schreibe sie in den leeren Kasten.

3. Schreibe einen ausführlichen Text zum Thema **Energie**, indem du die markierten Begriffe verwendest.

**Abb. 1:** Ausschnitt aus dem Instrument zur Analyse der Vernetzungsleistungen von Schüler\*innen zum Basiskonzept Energie

In Anlehnung an die Arbeiten von van Kirk (1979), der seinen Proband\*innen Satzbildungsaufgaben mit vorgegebenen Begriffen zu biologischen Themen vorlegte, erhalten die Schüler\*innen in unseren Studien eine Liste mit 26 Begriffselementen des Basiskonzepts Energie, um sie beim Schreiben der Essays zu unterstützen (Abb. 1). Die eigens zusammengestellte Liste beinhaltet besonders relevante Begriffselemente zum Thema Energie, die wir in einem ersten Verfahrensschritt aus den Rahmenlehrplänen Berlin und Brandenburgs der Fächer Biologie, Chemie und Physik extrahiert haben (SenBJF Berlin, 2017a-c). In einem zweiten Schritt wurden 107 Lehrer\*innen gebeten, die 108 Begriffselemente umfassende Liste hinsichtlich ihrer Relevanz für ihr jeweiliges Unterrichtsfach zu bewerten (Dietz et al., 2021). Um die Liste, die wir den Schüler\*innen schlussendlich vorgelegt haben, auf eine überschaubare Zahl von Begriffselementen zu begrenzen, haben wir die fünf häufigsten Nennungen der Lehrer\*innen für das jeweilige naturwissenschaftliche Unterrichtsfach zusammengetragen. Ergänzt wurden diese 15 Elemente der Liste um die Begriffselemente, deren Behandlung in mindestens zwei oder in sogar allen drei fachspezifischen Rahmenlehrplänen Berlin und Brandenburgs explizit eingefordert werden (SenBJF Berlin, 2017a-

c). Um keine fachbezogene Assoziationsketten zu provozieren, haben wir die Datenerhebung nicht im naturwissenschaftlichen Fachunterricht, sondern während einer Deutschstunde, durchgeführt.

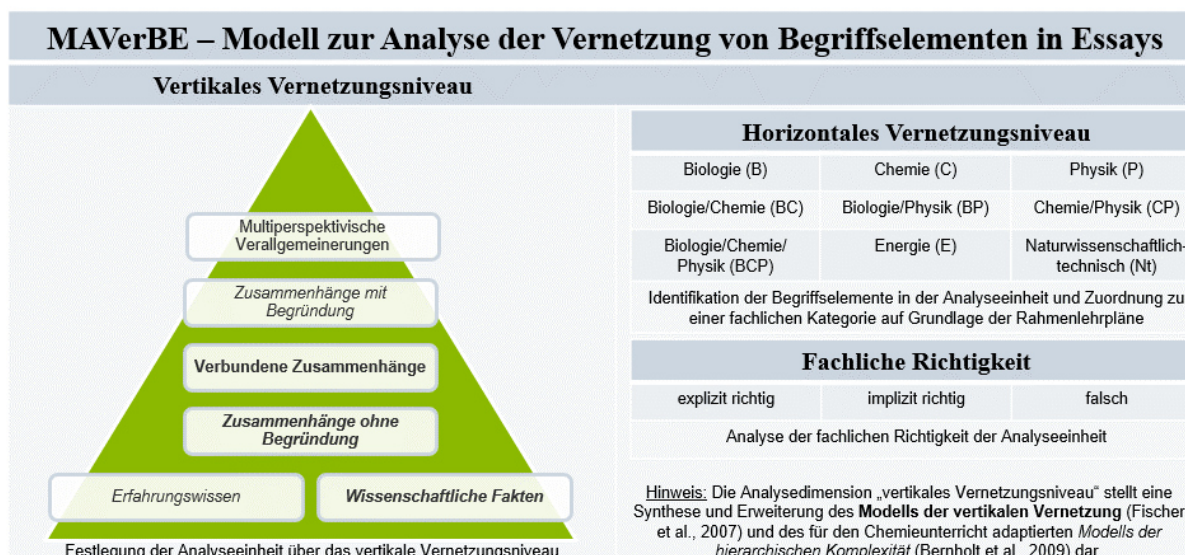
#### 4.2 Das Modell zur Analyse der Vernetzung von Begriffselementen in Essays (MAVerBE)

Zur Analyse der Essays greifen wir auf die Methode der inhaltlich-strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse unter Verwendung einer Kombination von inhaltlichen und skalierenden Kategorien zurück (Mayring, 2015). Auf Basis der im Theoriekapitel dargestellten Vorarbeiten haben wir ein eigenes Modell entwickelt, mit welchem nicht nur die vertikalen, sondern auch die horizontalen Vernetzungsleistungen von Schüler\*innen in den Essays umfassend untersucht werden können. Das Modell zur Analyse der Vernetzung von Begriffselementen in Essays (kurz: MAVerBE) besteht aus einem dreidimensionalen Kategoriensystem (Abb. 2, s. nächste Seite).

Für die *erste Analysedimension* verwenden wir eine Synthese des Modells der vertikalen Vernetzung (Fischer et al., 2007, im Folgenden: MvV) und des von Bernholt et al. (2009) für den Chemieunterricht adaptierten Modells der hierarchischen Komplexität (MHC-C). Für unsere Synthese berücksichtigen wir sowohl die theoretischen Vorarbeiten zum Vergleich des MvV und des MHC-C (Woitkowski et al., 2011) als auch die von Nehring, Päßler und Tiemann (2017) beschriebenen praktischen Erfahrungen bei der Kodierung desselben Datenmaterials mit beiden Modellen. Außerdem ist der im Folgenden dargestellte Ansatz für das von uns gewählte Aufgabenformat *Essay* u.E. bestmöglich geeignet.

Auf einem niedrigen vertikalen Vernetzungsniveau nutzen die Schüler\*innen einen bis maximal zwei Begriffe in einfachen Teil-Ganzes-Relationen. Diese Relationen sind häufig an der Verwendung einfacher Verben wie „sein“ und „haben“ erkennbar. Diese wenig komplexen Schilderungen können entweder auf (un)wissenschaftlichen Präkonzepten oder wissenschaftlichen Fakten beruhen. Daher berücksichtigen wir in unserem Modell neben der sowohl im MvV als auch im MHC-C enthaltenen Kategorie *Fakten* auch die ausschließlich im MHC-C vorgeschlagene Kategorie *Erfahrungswissen*. Im Gegensatz zum MHC-C sind wir der Ansicht, dass die Kategorien *Erfahrungswissen* und *Fakten* als gleichwertig anzusehen sind, da in beiden Fällen Begriffselemente in einer ähnlichen Art und Weise *wenig komplex* verknüpft werden.

In der nächsthöheren Kategorie unseres MAVerBE werden mindestens zwei Begriffe in einer qualitativ höherwertigen Art und Weise verknüpft. In diese Kategorie gehören zeitliche Relationen, die den *Prozessbeschreibungen* im MHC-C entsprechen, aber auch Kausalitäten (also Ursache-Wirkungs-Beziehungen) sowie Bedingungen und Abhängigkeiten, wie sie z.B. aus der Kategorie *Zusammenhang* im MvV bekannt sind.



**Abb. 2:** Das MAVerBE beinhaltet ein dreidimensionales Kategoriensystem zur umfassenden Analyse der Vernetzungsleistungen von Schüler\*innen in Essays

Wir führen daher die Kategorien *Zusammenhang* des MvV und *Prozessbeschreibung* des MHC-C zusammen, und zwar auch deshalb, da unsere Pilotierungen gezeigt haben, dass häufig nur sprachliche Nuancen zur Diskriminierung von Aussagen in eine dieser beiden Kategorien führten. Ob ein Schüler bzw. eine Schülerin z.B. feststellt, dass im zeitlichen Verlauf einer chemischen Reaktion Wärmeenergie freigesetzt wird (was einer Prozessbeschreibung im MHC-C entspräche) oder durch eine chemische Reaktion Wärmeenergie freigesetzt wird (was einer Kausalität im MvV gleichkäme), ändert nur wenig daran, dass in beiden Fällen die Begriffselemente chemische Reaktion und Wärmeenergie komplexer als auf dem zuvor beschriebenen Erfahrungswissen- bzw. Faktenniveau miteinander verknüpft werden. Auch wenn im MHC von Commons (1998) als Grundlage für das MHC-C ein Komplexitätsunterschied zwischen den Leveln *primary* und *concrete* festgestellt wird, spricht die Berücksichtigung der schriftsprachlichen Kompetenzen der Schüler\*innen dafür, dass diese beiden Kategorien für die Analyse von Essays zu einer zusammengefasst werden sollten. Die so festgelegte Kategorie bezeichnen wir als *Zusammenhänge ohne Begründung*. Damit folgen wir hinsichtlich der Namensgebung dem Vorschlag von Woitkowski und Riese (2017, S.41), wonach Prozessbeschreibungen auch als unbegründete Zusammenhänge bezeichnet werden können. Mit dieser klaren Trennung zwischen einer wenig komplexen Verknüpfung auf der Ebene des Erfahrungs- und Faktenwissens und einer komplexeren Verknüpfung von Begriffselementen auf der Ebene der unbegründeten Zusammenhänge erhoffen wir uns, die bereits im Theoriekapitel beschriebene Unschärfe zwischen den Kategorien *Fakten*, *Prozessbeschreibung* und *Zusammenhänge* beim Vergleich des MvV und des MHC-C aufzuheben (Woitkowski et al., 2011; Nehring et al., 2017).

Im MvV wird mit den Kategorien *mehrere Fakten* und *unverbundene Zusammenhänge* die Anzahl der zu verknüpfenden Begriffe berücksichtigt. Aufzählungen von Fakten bzw. Zusammenhängen werden im MvV ein höheres vertikales Komplexitätsniveau zugesprochen als dem einzelnen Fakt bzw. dem einzelnen Zusammenhang (Fischer et al., 2007). In unserem MAVerBE berücksichtigen wir diese beiden Kategorien jedoch nicht, weil es unseres Erachtens für die Analyse der Vernetzung des begrifflichen Wissens der Schüler\*innen unerheblich ist, ob die Schüler\*innen Elemente in einem Essay in Form von Aufzählungen oder in Form von durch andere Äußerungen getrennten Sätzen darlegen. Dieses Vorgehen deckt sich mit den Ausführungen von Commons et al. (1998, S.240), nach denen eine beliebige Verknüpfung von Elementen einer unteren Stufe nicht zu einer höheren Komplexität führt. Höhere Komplexitätsstufen werden jedoch mit einer steigenden Anzahl an Verknüpfungsoperationen erreicht (Commons et al., 1998, S.252). Eine solche Steigerung ist zunächst einmal durch das gezielte, also nicht-willkürliche, Verknüpfen von Zusammenhängen miteinander möglich. Die Verknüpfung muss dabei so gestaltet sein, dass der „Outcome“ des ersten Zusammenhangs den des zweiten beeinflusst (Commons et al., 1998, S. 254). Dies ist beispielsweise bei einer Kausalkette der Fall. Kausalketten können u.a. bei der Beschreibung mehrerer miteinander gekoppelter Energieumwandlungsprozesse formuliert werden. Auf diese Weise verknüpfte Zusammenhänge ordnen wir der auch im MvV enthaltenen Kategorie *verbundene Zusammenhänge* zu.

Eine zusätzliche Steigerung des vertikalen Komplexitätsniveaus besteht darin, die Verknüpfung von Zusammenhängen in Form einer Begründung zu gestalten. Im MHC-C wird in der Begründung eines Zusammenhangs ein komplexitätssteigerndes Merkmal gesehen. Begründete Zusammenhänge werden im

MHC-C als *lineare Kausalität* bezeichnet (Bernholt et al., 2009, S.231). Wir folgen auch in diesem Fall dem Namensvorschlag von Woitkowski und Riese (2017, S.41) und bezeichnen diese Kategorie als *Zusammenhänge mit Begründung*.

In der eigens entwickelten höchsten Vernetzungskategorie, die wir als *Multiperspektivische Verallgemeinerungen* bezeichnen, berücksichtigen wir solche Ausführungen von Schüler\*innen, in denen sie in besonderem Maße abstrakte Leitideen bzw. Konzepte des Energiebegriffs miteinander verknüpfen und an mindestens einem Beispiel erläutern. Zu diesen Leitideen bzw. Konzepten gehören die Energieformen und Energiequellen, die Energieumwandlung, der Energietransfer, die Energieentwertung, die Energieerhaltung sowie die Entropie (Duit, 1986; 2014; Neumann et al., 2013; Poggi et al., 2017). Die besondere Vernetzungsleistung besteht unseres Erachtens darin, dass die Schüler\*innen Begriffe einer sehr hohen Abstraktionsebene verwenden (Dörner, 1976) und dabei in Anlehnung an die von Aebli (1981, S.206) beschriebene Perspektivbildung, die temporär gebildeten unterschiedlichen Begriffshierarchien miteinander verknüpfen. So gesehen blicken die Schüler\*innen also multiperspektivisch in ihr begriffliches Wissensnetz.

In der *zweiten Analysedimension* suchen wir in Anlehnung an Lewing und Schneider (2019) nach kookkurrenten Begriffen. Als kookkurrent definieren wir solche Begriffe, die sich in denselben Analyseeinheiten befinden, die wir im Zuge der Analyse des vertikalen Vernetzungsniveaus identifiziert haben. Die Zuordnung der Begriffe zu einem Unterrichtsfach oder zu einer Kombination mehrerer Unterrichtsfächer erfolgt über die Überprüfung, in welchem bzw. in welchen naturwissenschaftlichen Rahmenlehrplänen Berlin und Brandenburgs sich diese befinden.

Zusätzlich zu der Analyse der vertikalen und horizontalen Vernetzungsniveaus analysieren wir außerdem die fachliche Richtigkeit innerhalb der identifizierten Analyseeinheiten. Da die Äußerungen von Schüler\*innen in der Regel nicht druckreif formuliert sind, also nicht immer eindeutig als fachlich korrekt oder falsch klassifiziert werden können, haben wir uns entschlossen zwischen explizit richtigen, implizit richtigen und offensichtlich falschen Aussagen der Schüler\*innen zu unterscheiden. Dieser Fokus repräsentiert die *dritte Analysedimension*.

Für die Kodierung der Einschätzungsdimensionen *vertikales Vernetzungsniveau* und *fachliche Richtigkeit* nutzen wir die Software MAXQDA 2020 (VERBI Software, 2019). Die im Zuge dieser Auswertung identifizierten Analyseeinheiten werden mit MAXQDA in Form einer Excel-Tabelle extrahiert. Im Anschluss wird innerhalb dieser Excel-Tabelle die Anzahl der identifizierten Begriffselemente in der jeweiligen fachlichen Kategorie notiert. Nach Durchführung der Kookkurrenzberechnungen in Excel

werden diese Daten mit Hilfe der Software UCINET (Borgatti et al., 2013) visualisiert (s. Abb. 3b).

## 5. Ausgewählte Ergebnisse

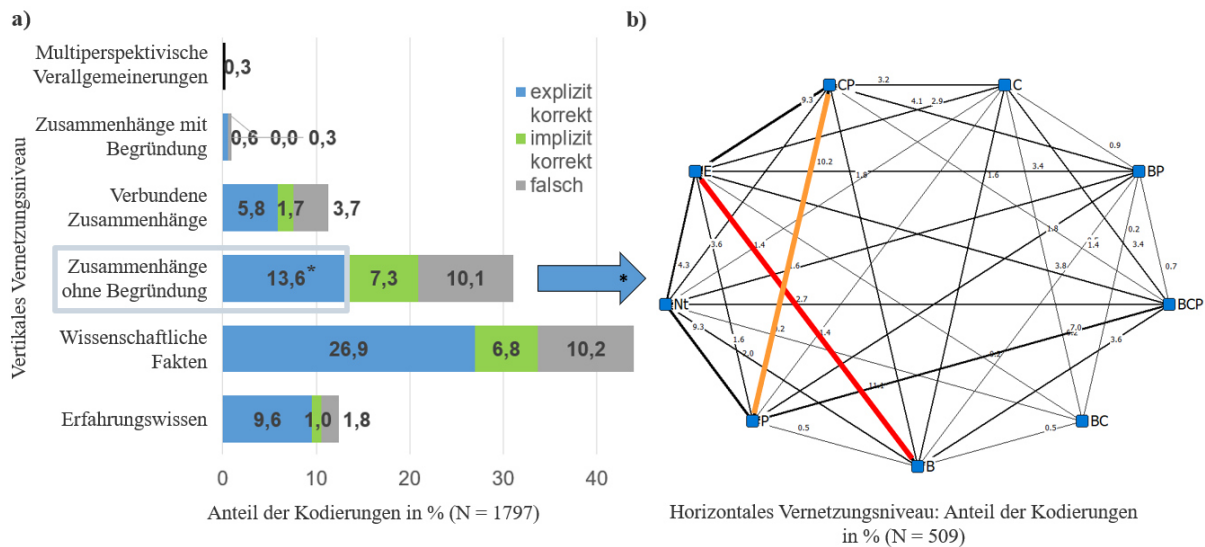
### 5.1 Stichprobe

Anfang des Schuljahres 2019/20 haben wir 134 Schüler\*innen des 9. Jahrgangs eines Gymnasiums während einer Deutschunterrichtsstunde (Dauer der Unterrichtsstunde: 45 Minuten) gebeten, ein Essay zum Thema Energie zu schreiben. 132 Essays von 73 Schülerinnen und 54 Schülern (5 Schüler\*innen machten keine Angabe; zwei Essays mussten aussortiert werden) gingen in die Analysen ein. Die Schüler\*innen waren im Mittel  $13,9 \pm 0,4$  Jahre alt. Im Durchschnitt haben die Schüler\*innen  $126 \pm 75$  Wörter lange Essays verfasst.

### 5.2 Analyse vertikaler Vernetzungsleistungen

Dem Analyseverfahren folgend wurden in den 132 Essays insgesamt 1894 Analyseeinheiten (und somit durchschnittlich 14,3 Analyseeinheiten pro Essay) identifiziert. Davon konnten 1797 Kodierungen einem vertikalen Vernetzungsniveau zugeordnet werden. Die restlichen Analyseeinheiten waren wiederholende oder im Sinn unklare Aussagen.

Die Verteilung dieser Analyseeinheiten auf die sechs Kategorien der ersten Analysedimension ist in Abbildung 3a (s. nächste Seite) dargestellt. Auffällig ist, dass mehr als die Hälfte (56,3 %) der von den Schüler\*innen getätigten Aussagen einem niedrigen vertikalen Vernetzungsniveau zuzuordnen sind, also den Kategorien *Erfahrungswissen* oder *wissenschaftliche Fakten* zugewiesen werden müssen. Zu den häufigsten Nennungen auf diesem niedrigen Vernetzungsniveau gehören das Aufzählen verschiedener Energieformen sowie das Wiedergeben von Eigenschaften der Energie. Die mit 31,0 % am zweithäufigsten besetzte Kategorie ist die Kategorie *Zusammenhänge ohne Begründung*. Innerhalb dieser Kategorie häufen sich Aussagen darüber, für welche Prozesse Energie benötigt wird. Auch die Beschreibung einfacher Energieumwandlungsprozesse (je nach Formulierung der Schüler\*innen als Kausalität oder Prozessbeschreibung) fällt in diese Kategorie. 11,2 % der Aussagen der Schüler\*innen werden der Kategorie *verbundene Zusammenhänge* zugeordnet. In diesen Fällen verknüpfen die Schüler\*innen besonders häufig die zuvor genannten Bedingungen oder Energieumwandlungsprozesse mit weiteren Energieumwandlungsprozessen; beispielsweise beschreiben die Schüler\*innen verhältnismäßig oft die miteinander gekoppelten Energieumwandlungsprozesse in einem Kohlekraftwerk. Ein besonders hohes vertikales Vernetzungsniveau in Form eines *Zusammenhangs mit Begründung* (0,9 %) oder einer *multiperspektivischen Verallgemeinerung* (0,3 %) wird nur äußerst selten erreicht.



**Abb. 3:** Ausgewählte Ergebnisse aus der Analyse von 132 Essays mit dem MAVerBE. a) mit Blick auf das vertikale Vernetzungsniveau inklusive Beurteilung der fachlichen Richtigkeit, b) mit Blick auf das horizontale Vernetzungsniveau der explizit richtigen Schüleräußerungen auf dem vertikalen Vernetzungsniveau *Zusammenhänge ohne Begründung*; dominierende Vernetzungsstrukturen sind farblich hervorgehoben

### 5.3 Analyse horizontaler Vernetzungsleistungen

Innerhalb der Aussagen eines vertikalen Vernetzungsniveaus haben wir, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, die horizontalen Vernetzungsleistungen untersucht. Exemplarisch haben wir die Ergebnisse einer solchen Analyse für die explizit richtigen *Zusammenhänge ohne Begründung* in der Abbildung 3b dargestellt. In dieser Kategorie konnten 509 Kookkurrenzen verschiedener Begriffselemente ermittelt werden. Die fachliche Zuordnung der Begriffselemente zu einem Fach bzw. einer Fächerkombination, die wir auf Grundlage der Berliner und Brandenburger Rahmenlehrpläne vorgenommen haben, ergab mit 11,1 % eine besondere Häufung der horizontalen Vernetzungen zwischen dem Energiebegriff (E) und Begriffselementen aus der Biologie (B) (siehe Abb. 3b, rot hervorgehobene Verbindung). Die Schüler\*innen formulierten hier besonders häufig unbegründete Zusammenhänge zu den Themen Ernährung oder Photosynthese als Möglichkeiten der Energiegewinnung. Eine weitere Häufung mit 10,2 % zeigt sich zwischen Begriffselementen der Physik (P) und der Fächerkombination Chemie/Physik (CP) (Abb. 3b, orange hervorgehobene Verbindung). In diesem Kontext formulierten die Schüler\*innen auffällig oft unbegründete Zusammenhänge zwischen den Begriffselementen elektrische Energie (P) und Wärme oder Licht (beide CP). Die häufige Nutzung der Begriffselemente elektrische Energie, Wärme und Licht deckt sich mit den Ergebnissen aus der Replikationsstudie von Crossley, Hirn und Starauscheck (2009). In dieser Studie sollten Schüler\*innen der 9. Jahrgangsstufe in Assoziationstests aufschreiben, woran sie denken, wenn sie das Wort Energie hören, und was sie unter Energie verstehen. Im Rahmen dieser Befragung verwendeten die Schüler\*innen einer 9. Jahrgangsstufe eines Gymnasiums ebenfalls häufig die

Begriffselemente elektrische Energie, Wärme und Licht (Crossley et al., 2009, S.4).

### 6. Diskussion

Die Ergebnisse unserer Analysen sprechen dafür, dass es uns gelungen ist, *ein Instrument zur Analyse sowohl vertikaler als auch horizontaler Vernetzungsstrukturen in Essays von Schüler\*innen zum Basiskonzept Energie* zu entwickeln. Zugegeben: Die Orientierung an den Nennungen der Begriffselemente in den jeweiligen fachspezifischen Rahmenlehrplänen zur Einschätzung der horizontalen Vernetzungsdimension ist kritisch zu diskutieren. Da Rahmenlehrpläne aber als eine Art gesellschaftlich verhandelter Konsens zu verstehen sind, der schließlich auf den jeweiligen Expertisen ausgewählter Expert\*innen der Rahmenplankommissionen beruht, stellt die von uns getroffene Entscheidung zumindest einen möglichst objektiven und funktionalen Zugang dar.

Außerdem ist in Anbetracht der Besetzungshäufigkeiten der sechs Kategorien des vertikalen Vernetzungsniveaus zu diskutieren, ob in zukünftigen Arbeiten das vierte Niveau (*verbundene Zusammenhänge*) und das fünfte Niveau (*Zusammenhänge mit Begründung*) zu einer gemeinsamen Kategorie zusammengefasst werden sollten, da – wie Abbildung 3a unterstreicht – Aussagen der Schüler\*innen dem fünften Niveau nur sehr selten zuzuordnen waren.

### 7. Ausblick

Mit der hier vor- und zur Diskussion gestellten Untersuchung haben wir eine Art Bestandsaufnahme vorgenommen. Wir haben Schüler\*innen des zunächst letzten Jahrgangs eines Berliner Gymnasiums hinsichtlich ihres Verständnisses bezüglich des Energiekonzepts untersucht, denen in den Jahrgangsstufen 7 und 8 der deutschen Tradition entsprechend Unterricht in den naturwissenschaftlichen Fächern

fächerdifferenziert erteilt wurde. Wir haben zu rekonstruieren versucht, welche Vernetzungsstrukturen ihren Begriffsverständnissen zugrunde liegen. Über die Qualität dieser Schüler\*innen-Leistungen kann man geteilter Meinung dahingehend sein, ob die Performanz der Schüler\*innen nun zu loben sei oder hinter den Erwartungen zurückgeblieben sind. Eine abschließende Bewertung dieser Frage möchten wir nicht vornehmen, da unsere Forschungsintentionen anders gelagert sind. Im nächsten Schritt wollen wir nämlich der Frage nachgehen, ob und in welcher Weise die Vernetzungsleistungen von Schüler\*innen, die an derselben Schule in den folgenden Schuljahren an einem integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht teilgenommen haben, zu unterscheiden sind. Zu diesem Zweck haben wir zu Beginn des Schuljahres 2020/21 Schüler\*innen der 9. Jahrgangsstufe gebeten, Essays zur gleichen Aufgabenstellung zu schreiben. Diese Schüler\*innen hatten in den beiden Schuljahren zuvor am integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht dieses Gymnasiums teilgenommen. Die Ergebnisse unserer laufenden Analysen werden wir zeitnah zur Diskussion stellen.

## 8. Literatur

- Achtenhagen, F., John, E. G., Preiß, P., Tramm, T., Schunck, A., Seemann-Weymar, H. (1992). *Lernhandeln in komplexen Situationen*. Neue Konzepte einer betriebswirtschaftlichen Ausbildung. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- Aebli, H. (1980). *Denken: das Ordnen des Tuns. Band 1: Kognitive Aspekte der Handlungstheorie*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Aebli, H. (1981). *Denken: das Ordnen des Tuns. Band 2: Denkprozesse*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Aebli, H. (2003). *Zwölf Grundformen des Lehrens*. 12. Auflage. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Baumert, J., Lehmann, R., Lehrke, M., Schmitz, B., Clausen, M., Hosenfeld, I., Köller, O. & Neubrand, J. (Hrsg.). (1997). *TIMSS – mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich: deskriptive Befunde*. Opladen: Leske + Budrich.
- Baumert, J., Klieme, E., Neubrand, M., Prenzel, M., Schiefele, U., Schneider, W., Stanat, P., Tillmann, K.-J. & Weiß, M. (Hrsg.). (2001). *PISA 2000 - Basiskompetenzen von Schülerinnen und Schülern im internationalen Vergleich*. Opladen: Leske & Budrich.
- Bernholt, S., Parchmann, I. & Commons, M. L. (2009). Kompetenzmodellierung zwischen Forschung und Unterrichtspraxis. *ZfDN*, 15, 219-245.
- Bernholt, S. (2010). *Kompetenzmodellierung in der Chemie – Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*. Berlin: Logos.
- BLK-Projektgruppe Innovation im Bildungswesen (1997). *Expertise „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“*, Materialien zur Bildungsplanung und Forschungsförderung, Heft 60, Bonn.
- Borgatti, S. P., Everett, M. G. & Johnson, J. C. (2013). *Analyzing Social Networks*. Sage Publications.
- Commons, M. L., Trudeau, E. J., Stein, S. A., Richards, F. A. & Krause, S. R. (1998). Hierarchical Complexity of Tasks Shows the Existence of Developmental Stages. *Developmental Review*, 18(3), 237-278.
- Crossley, A., Hirn, N., Staraschek, E. (2009). Schüervorstellungen zur Energie - Eine Replikationsstudie -. In *CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (S. 1-9), Bochum.
- De Jong, T., Ferguson-Hessler, M. G. M. (1996). Types and Qualities of Knowledge. *Educational Psychologist*, 31(2), 105-113.
- Demuth, R., Ralle, B. & Parchmann, I. (2005). Basiskonzepte – eine Herausforderung an den Chemieunterricht. *Chemkon*, 12(2), 55-60.
- Dietz, D., Hickmann, P., Lenze, J. & Bolte, C. (2021). Analyse der Vernetzung von Begriffselementen im Basiskonzept Energie. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik online Jahrestagung 2020* (S. 193-196).
- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Duit, R. (1986). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. Kiel: IPN.
- Duit, R. (2014). Teaching and Learning the Physics Energy Concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, & A. Scheff. (Ed.), *Teaching and Learning of Energy in K-12 Education*. Switzerland: Springer.
- Fischer, H. E., Glemnitz, I., Kauertz, A., Sumfleth, E. (2007). Auf Wissen aufbauen – Kumulatives Lernen in Chemie und Physik. In E. Kircher, R. Girwidz, P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gagné, R. M. (1970). *Die Bedingungen des menschlichen Lernens*. 2. Auflage. Hannover: Hermann Schroedel Verlag KG.
- Härtig, H. (2010). *Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests*. Berlin: Logos.
- Kauertz, A. (2008). *Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben*. Berlin: Logos.
- Kauertz, A., Fischer, H. E., Mayer, J., Sumfleth, E. & Walpuski, M. (2010). Standardbezogene Kompetenzmodellierung in den Naturwissenschaften der Sekundarstufe I. *ZfDN*, 16, 135-153.



- Kultusministerkonferenz (KMK) (2005a). *Bildungsstandards im Fach Biologie für den mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2005b). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2005c). *Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand.
- Laird, J. E., Rosenbloom, P. S. Newell, A. (1986). Chunking in soas: the anatomy of learning mechanisms. *Machine Learning*, 1, 11-46.
- Lewing, J., Schneider, S. (2019). Sachstrukturen in Schulbüchern des naturwissenschaftlichen Unterrichts – Kookkurenzanalyse von Fachbegriffen der naturwissenschaftlichen Fächer. In *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Kiel 2018* (S. 723-726).
- Mandl, H. (2006). Wissensaufbau aktiv gestalten. *Schüler 2006*. 28-30.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. 12. Auflage. Weinheim und Basel: Beltz-Verlag.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity to process information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Nehring, A., Päßler, A. & Tiemann, R. (2017). The Complexity of Teacher Questions in Chemistry Classrooms: an Empirical Analysis on the Basis of Two Competence Models. *Int J of Sci and Math Educ*, 15, 233-250.
- Neumann, K.; Fischer, H. E. & Sumfleth, E. (2008). Vertikale Vernetzung und kumulatives Lernen im Chemie- und Physikunterricht. In E.-M. Lankes (Hrsg.), *Pädagogische Professionalität als Gegenstand empirischer Forschung* (S. 141 – 151). Münster: Waxmann.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., Fischer, H.E. (2013). Towards a Learning Progression of Energy. *J Res Sci Teach*, 50, 162-188.
- Prenzel, M., Baumert, J., Blum, W., Lehmann, R., Leutner, D., Neubrand, M., Pekrun, R., Rolff, H.-G., Rost, J. & Schiefele, U. (Hrsg.). (2004). *PISA 2003. Der Bildungsstand der Jugendlichen in Deutschland – Ergebnisse des zweiten internationalen Vergleichs*. Münster: Waxmann.
- Podschuweit, S., Bernholt, S. & Brückmann, M. (2016). Classroom learning and achievement: how the complexity of classroom interaction impacts students' learning. *Research in Science & Technological Education*. 1-22.
- Poggi, V., Miceli, C., Testa, I. (2017). Teaching energy using an integrated science approach. *Phys. Educ*. 52, 1-9.
- Ropohl, M. (2010). *Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion: Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*. Berlin: Logos.
- Schnotz, W. (1994). *Aufbau von Wissensstrukturen. Untersuchungen zur Kohärenzbildung bei Wissenserwerb mit Texten*. Weinheim: Beltz.
- Selz, O. (1913). *Über die Gesetze des geordneten Denkverlaufs*. Stuttgart: Spemann.
- Selz, O. (1922). *Zur Psychologie des produktiven Denkens und des Irrtums*. Bonn: Cohen.
- Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie Berlin (2017a). *Rahmenlehrplan Teil C Biologie, Jahrgangsstufen 7-10*. [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fas-sung/Teil\\_C\\_Biologie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fas-sung/Teil_C_Biologie_2015_11_10_WEB.pdf)
- Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie Berlin (2017b). *Rahmenlehrplan Teil C Chemie, Jahrgangsstufen 7-10*. [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fas-sung/Teil\\_C\\_Chemie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fas-sung/Teil_C_Chemie_2015_11_10_WEB.pdf)
- Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie Berlin (2017c). *Rahmenlehrplan Teil C Physik, Jahrgangsstufen 7-10*. [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fas-sung/Teil\\_C\\_Physik\\_2015\\_11\\_16\\_web.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fas-sung/Teil_C_Physik_2015_11_16_web.pdf)
- Stewart, J. (1980). Techniques for Assessing and Representing Information in Cognitive Structure. *Science Education*, 64(2), 223-235.
- Van Kirk, J. (1979). *Content analysis using cognitive science techniques*. Paper presented at the 1979 Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Atlanta, GA.
- VERBI Software (2019). *MAXQDA 2020* [computer software]. Berlin: VERBI Software. Verfügbar unter maxqda.com.
- Wadouh, J., Sandmann, A. & Neuhaus, B. (2009). Vernetzung im Biologieunterricht – deskriptive Befunde einer Videostudie. *ZfDN*, 15, 69-87.
- Woitkowski, D., Riese, J. & Reinhold, P. (2011). Kriterienorientierte Konstruktion eines Kompetenzniveaumodells im physikalischen Fachwissen. *ZfDN*, 17, 289-313.
- Woitkowski, D. & Riese, J. (2017). Modellierung fachwissenschaftlicher Kompetenz angehender Physiklehrkräfte. *ZfDN*, 23, 39-52.