

Analogien im Physikunterricht

- Chancen und Grenzen -

CHRISTOPH, THORWARTL

CHRISTOPH.THORWARTL@SBG.AC.AT

Zusammenfassung

Es gibt eine Fülle von strukturellen und inhaltlichen Zusammenhängen in der Physik. Um diese zu verstehen und neue Wissensgebiete besser erschließen zu können, hilft eine intuitive Herangehensweise. Analogien erleichtern den Zugang zu neuem, bisher unbekanntem Wissen über die Betrachtung des Vertrauten (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2014). Durch eine gewinnbringende Implementierung von Analogien in den Unterricht wird ein konzeptionelles Verständnis der Physik gefördert und ein vernetzendes Wissen generiert (Krause, 2013). Die Vermittlung von „trägem Wissen“ (Whitehead, 1952) kann dadurch vorgebeugt werden. Konkrete schultaugliche Beispiele sind in der Literatur kaum angeführt. Der pädagogische und didaktische Mehrwert wird meist am Beispiel der Strom- und Wasserkreislaufanalogie beleuchtet. Die vorliegende Arbeit beinhaltet neben einer theoretischen Verankerung der Inhalte, einen Reihe von praxisrelevanten Beispielen, welche im Unterricht eingesetzt werden können.

1 Begriffsbildung

Kircher et al. (2014) sprechen von Analogien, „wenn man aufgrund von Ähnlichkeiten mit Bekanntem oder durch einen Vergleich einen bis dahin unbekanntem Sachverhalt erkennt und versteht.“ Eine Analogie dient in der Schnittstelle von bekanntem zu unbekanntem Wissen als Brücke (siehe Abb.1). Dem Lernenden wird also der Zugang zu unbekanntem Wissen erleichtert, indem ein Vergleich zu bereits Bekanntem gezogen wird.

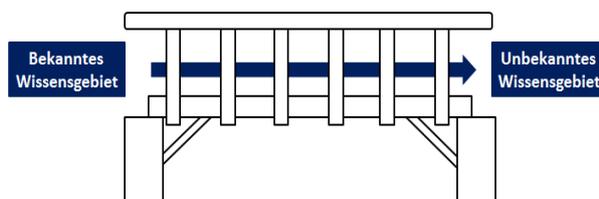


Abb. 1 – Analogie als Brücke von bekanntem zu unbekanntem Wissensgebiet

Im Gegensatz zu Analogien ist ein physikalisches Modell eine vereinfachte oder idealisierte Vorstellung von Objekten, Systemen oder Prozessen (Berger et al., 2011). Modelle stellen also Vereinfachungen der Wirklichkeit dar. Manche Modelleigenschaften stimmen mit den Eigenschaften der Wirklichkeit überein, manche jedoch nicht. Einige Analogien werden in der Literatur auch als Modelle bezeichnet, je nachdem welche Perspektive eingenommen wird. Eine strikte Abgrenzung von Modellen und Analogien ist daher teilweise nicht möglich.

2 Analogien als zweischneidiges Schwert

Aus der Wissenschaftsgeschichte ist bekannt, dass Analogien beim Erkenntnisprozess eine zentrale Rolle einnehmen. Das Gravitationsgesetz nach Newton weist die gleiche mathematische Struktur auf wie das Coulomb'sche Gesetz. Coulomb konnte sich an dem 100 Jahre zuvor entdeckten, formal ähnlichen Gravitationsgesetz orientieren (Tiemann, 1993). Auch Ohm hat beim Aufstellen seiner Gesetze über strömende Elektrizität eine Analogie zur Wärmeleitung hergestellt (Klinger, 1987).

Analogiebetrachtungen können jedoch auch in die Irre leiten und Präkonzepte entstehen lassen. Mario Bunge drückt es treffend aus, wenn er sagt:

„Analogien sind zweifellos fruchtbar, aber sie haben genauso viele Monster hervorgebracht wie gesunde Babys“ (z.n. Duit & Glynn, 1995, S. 4-10).

Sachverhalte und Zusammenhänge, sachlich zulässig zu vereinfachen, ist eine fordernde Aufgabe für Lehrpersonen. Durch zu starkes Elementarisieren oder Simplifizieren können falsche Assoziationen bei Schüler/Innen hervorgerufen werden (Berger et al., 2011). Analogien können im Unterricht nicht vorbehaltlos Anwendung finden. Für den Physikunterricht sind sie relevant, wenn sie sich an physikalische Grundmuster der didaktischen Rekonstruktion halten (Krause, 2014). Unter didaktischer Rekonstruktion wird der Wiederaufbau von Strukturen aus Sinneinheiten verstanden (Kettmann et al., 1997, z.n. Kircher et al., 2014).

Elementarisieren hingegen ist die Gegenoperation, also das Zerlegen von komplexen Dingen in elementare Sinneinheiten. In Abb. 2 sind die methodischen Schritte der didaktischen Rekonstruktion am Beispiel des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes dargestellt. Dieses Beispiel wurde aus Kircher et al. (2014, S. 116-117) entnommen und orientiert sich an Wagenschein (1970, S. 167 f.).



Abb. 2 – Didaktischen Rekonstruktion am Beispiel des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes (Kircher et al., 2014, S. 116-117)

Es besteht ein allgemeiner Konsens in der Fachdidaktik, dass Analogien gewinnbringend in den Unterricht implementiert werden können. Es sind didaktische Bedingungen für die Nutzung von Analogien notwendig.

- (1) Es muss eine Oberflächenähnlichkeit zwischen dem primären und dem sekundären (=analogen) Lernbereich bestehen, da ansonsten ein Akzeptanzproblem bei den Lernenden entsteht (Gentner, 1989).
- (2) Analogien müssen zusätzlich Tiefenstrukturähnlichkeiten aufweisen (Kircher et al., 2014).
- (3) Die Unterschiede und Eigengesetzlichkeiten der Lernbereiche müssen thematisiert und die Grenzen der Analogienutzung diskutiert werden (Kircher et al., 2014).

Bauer und Richter (1986) und Manthei (1992) sind der Ansicht, dass das Arbeiten und Denken mit Analogien häufiger im Unterricht an verschiedenen Beispielen eingesetzt werden soll. Kircher und Hauser (1995) gehen noch einen Schritt weiter und fordern, dass Schüler/Innen die Möglichkeit gegeben werden soll, selbst Analogien zu finden.

3 Dimensionen von Analogien am Beispiel der Wasseranalogie zum elektrischen Stromkreis

Laut Kircher et al. (2014) gibt es drei relevante Dimensionen von Analogien in der Physikdidaktik. Es wird unterschieden zwischen der Objektebene (O), der begrifflichen Ebene (B) und der experimentellen Ebene (E). Die Analogie kann sich auf eine oder mehrere dieser Ebenen beziehen. Die meisten Beispiele in der Physikdidaktik zeigen Ähnlichkeiten in einer oder in zwei dieser Dimensionen. Die bei Lehrpersonen sehr beliebte Wasseranalogie zum elektrischen Stromkreis, ist eine der wenigen, die Ähnlichkeiten in allen drei Dimensionen aufweist (siehe Abb. 3).

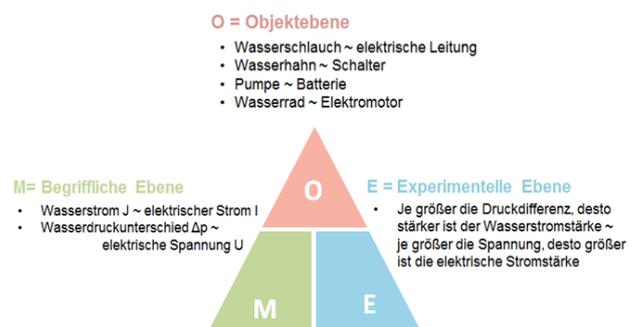


Abb. 3 – Dimensionen der Analogie am Beispiel der Wasseranalogie zum elektrischen Stromkreis (Kircher et al., 2014, S. 127)

Durch das Lernen mit und durch Analogien wird zwangsweise ein Umweg gemacht; zunächst muss der sekundäre Lernbereich (=analoge Lernbereich) erfasst werden, dadurch wird ein Zugang zum primären Lernbereich geschaffen (Kircher et al., 2014).

4 Einteilung von Analogien

Krause (2014) stellt ein Modell zur Verknüpfung zwischen bekanntem und unbekanntem Wissen durch Analogien vor. In diesem Modell werden folgende drei Ebenen unterschieden:

- (1) Strukturelle Gemeinsamkeiten von Analogien
- (2) Analogien als allgemeine heuristische Prinzipien
- (3) Analogien - Vehikel zur Vermittlung physikalischer Denkprinzipien als Lösungswerkzeuge

Diese drei Ebenen stehen nicht nebeneinander, sondern beinhalten einander (siehe Abb. 4). Im Kontext der Schule ist es sinnvoll, eine Unterscheidung zwischen strukturellen und inhaltlichen Ähnlichkeiten zu treffen. Das entspricht

bei Krause (2014) der ersten und zweiten Ebene. Nachfolgend werden konkrete Anwendungsbeispiele für den Unterricht hinsichtlich dieser Einteilung vorgestellt.

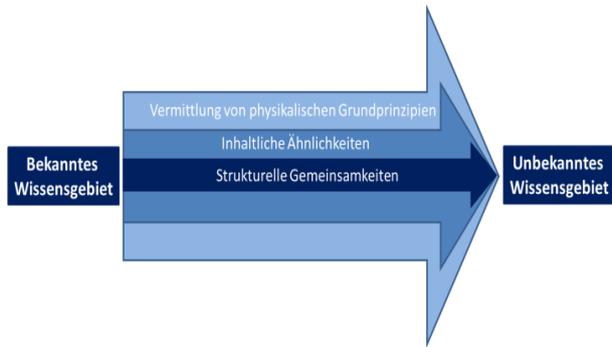


Abb. 4 – Modell zur Verknüpfung zwischen bekanntem und unbekanntem Wissen durch Analogien nach Krause (2014, S. 3)

4.1 Strukturelle Ähnlichkeiten

Zwei Wissensgebiete können Oberflächenmerkmale trotz fehlender inhaltlicher Zusammenhänge aufweisen. So kann beispielsweise das Weg-Zeit-Gesetz ($s(t) = v \cdot t$) mit dem Ohm'schen Gesetz ($U(t) = R \cdot I$) verglichen werden. Solche funktionale Zusammenhänge können entweder mathematisch oder grafisch beschrieben werden (siehe Abb. 5).

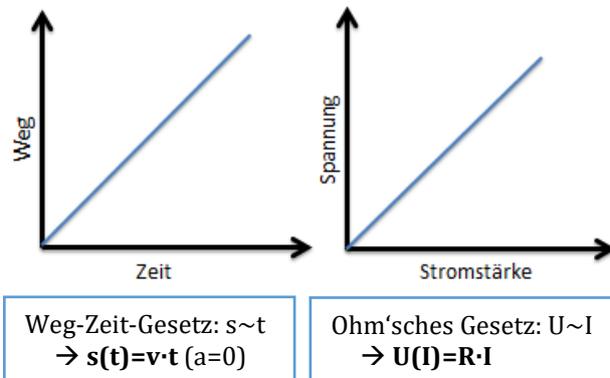


Abb. 5 – Strukturelle Gemeinsamkeit des Weg-Zeit-Gesetzes mit dem Ohm'schen Gesetz

In der Physik finden sich eine Fülle linearer Funktionen der Form $f(x) = kx + d$. Dabei ist die Gestalt der Funktion von der Steigung k und dem Absolutwert d abhängig. Wie in Abb. 6 ersichtlich, können verschiedene physikalische Gesetzmäßigkeiten miteinander verglichen werden. Durch die Bezugnahme auf den proportionalen Zusammenhang, beschrieben durch die lineare Funktion $f(x) = k \cdot x$, kann ein verzettendes Wissen generiert werden.

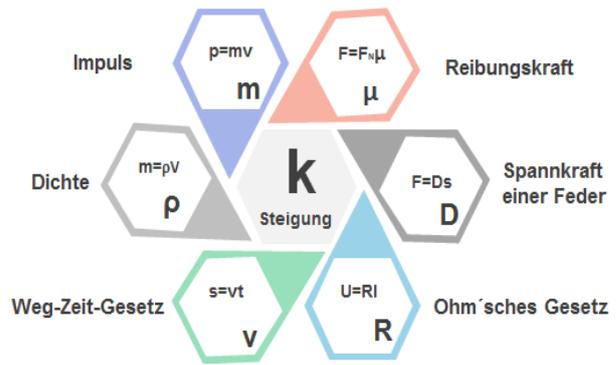


Abb. 6 – Steigung k als Schlüsselparameter von linearen Gleichungen

Auch das Boyle-Mariotte'sche Gesetz ($p \cdot V = konst.$) weist eine Ähnlichkeit mit dem Impuls ($m \cdot v = konst.$) und Drehimpulserhaltungssatz ($I \cdot \omega = konst.$) auf. Die Faktoren sind indirekt proportional zueinander, dementsprechend besteht eine gleiche mathematische Struktur (siehe Abb. 7).

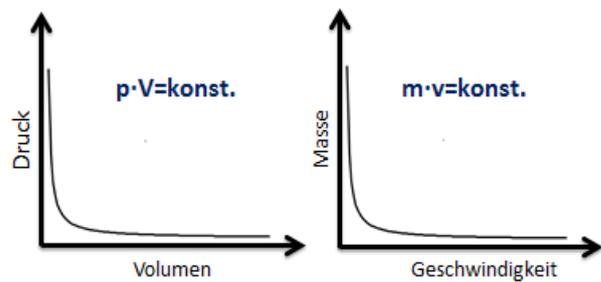


Abb. 7 – Strukturelle Gemeinsamkeit des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes mit dem Impulserhaltungssatz

4.2 Inhaltliche Zusammenhänge

Eine strukturelle Ähnlichkeit ist eine Voraussetzung, um inhaltliche Zusammenhänge feststellen zu können. Analogien dienen als methodische Wege zum Auffinden von Erkenntnissen – es handelt sich um ein allgemeines heuristisches Hilfsmittel.

Vergleich der Gravitationskraft mit der elektrischen Kraft

Eine Gegenüberstellung der Gravitationskraft und elektrischen Kraft (Coulomb'sche Wechselwirkung) ist aufgrund der hohen formalen Ähnlichkeiten sinnvoll. In Tab. 1 sind die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede abgebildet.

Gravitationskraft	Elektrische Kraft
$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	$F_{el} = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$
Proportional zu $1/r^2$, wirkt unendlich weit	Proportional zu $1/r^2$, wirkt unendlich weit
Proportional zum Produkt der beiden Massen	Proportional zum Produkt der beiden Ladungen
G kann nur experimentell ermittelt werden	k kann nur experimentell ermittelt werden
Massen können einander nur anziehen	Ungleiche Ladungen ziehen sich an, gleiche Ladungen stoßen sich ab
Relative Stärke: 10^{-38}	Relative Stärke: 10^{-2}

Tab. 1 – Vergleich der Gravitationskraft mit der elektrischen Kraft (Apolin, 2008, S. 49)

Potentielle mechanische und potentielle elektrische Energie

Der Energiebegriff ist in der Physik fundamental, daher ist es wichtig, dass dieser Begriff themenübergreifend vernetzt wird. Besitzt ein Körper potentielle Energie, so kann dieser Arbeit verrichten. Die potentielle Arbeit in der Mechanik ist intuitiv für Schüler/Innen erfassbar. Aus dieser Intuition heraus kann der Vergleich zur potentiellen elektrischen Energie gezogen werden (siehe Tab. 2).

potentielle mechanische Energie (E_p) **potentielle elektrische Energie (E_p)**

$W = E_p = m \cdot g \cdot h$	$W = E_p = Q \cdot U$
m... Masse [m]=kg g... Erdbeschleunigung [g]=m/s ² h... Höhenunterschied [h]=m	Q... Ladung [Q]=C U... Potentialdifferenz [U]=V
Um eine Masse von 1kg im Schwerfeld der Erde um 0,1m zu heben, ist die Arbeit von einem Joule nötig.	Um eine Ladung von 1 C im Spannungsfeld von 1 V zu transportieren, ist die Arbeit von einem Joule nötig.

Tab. 2 – Vergleich von potentieller mechanischer und potentieller elektrischer Energie (Apolin, 2008, S. 51)

Translations- und Rotationsbewegungen

Die Bewegungsgleichungen für rotatorische und translatorische Bewegungen weisen dieselbe formale Struktur auf. Für jede kinematische bzw. dynamische Größe bei Translationen gibt es eine zugehörige Größe für Rotationen. Im Folgenden ist eine tabellarische Gegenüberstellung angeführt (siehe Tab 3).

	Translation		Rotation
Zeit	t	Zeit	t
Weg	s	Drehwinkel	φ
Geschwindigkeit	$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	Winkelgeschwindigkeit	$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$
Beschleunigung	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	Winkelbeschleunigung	$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$
Masse	m	Trägheitsmoment	$I = mr^2$
Impuls	$p = mv$	Drehimpuls	$L = I\omega$
Impulssatz	$\Delta p = F\Delta t$	Drehimpulssatz	$\Delta L = M\Delta t$
Kinetische Energie	$E = \frac{1}{2}mv^2$	Rotationsenergie	$E = \frac{1}{2}I\omega^2$
Bewegungsgleichung	$F = ma$	Bewegungsgleichung	$M = I\alpha$

Tab. 3 – Vergleich von translatorischen und rotatorischen Bewegungsgrößen.

Impuls- und Drehimpulserhaltung

Die Impuls- und die Drehimpulserhaltung sind neben der Energieerhaltung fundamentale Konzepte in der Physik. Im Kontext von Bewegungen, u.a. im Sport, gibt es eine Fülle von alltagsnahen Beispielen für die Schule. Ob beim Weitsprung, Hochsprung (Fosbury-Flop), Werfen, Stoßen oder beim Reckturnen, überall lässt sich die Bewegung mit dem Impuls- und Drehimpulssatz beschreiben.

Bei einer Pirouette im Eiskunstlauf wird bspw. durch Annäherung der Körpersegmentmassen an die Körperlängsachse (=Drehachse) das Massenträgheitsmoment I gesenkt. Aufgrund der Drehimpulserhaltung ($I \cdot \omega = konst.$) nimmt die Winkelgeschwindigkeit ω dementsprechend zu. Ein analoges Verhalten ist beim Wurf zu beobachten. Beim Werfen wird der in der Hüfte erzeugte Impuls entlang der kinematischen Kette bis zum Ball übertragen. Durch das Ab-

bremsen des Oberarms wird der Impuls über das Ellbogengelenk auf den Unterarm übertragen. Da von proximal nach distal die Körpersegmentmassen m abnehmen, wird die Geschwindigkeit v dementsprechend höher. In Tab. 4 ist dieser Vergleich gegenübergestellt.

Drehimpulserhaltung	Impulserhaltung
$I \cdot \omega = konst.$	$m \cdot v = konst.$
$I \uparrow$ $\omega \downarrow$	$m_{Oberarm} \uparrow$ $v_{Oberarm} \downarrow$
$I \downarrow$ $\omega \uparrow$	$m_{Unterarm} \downarrow$ $v_{Unterarm} \uparrow$

Tab. 4 – Gegenüberstellung von Impuls- und Drehimpulserhaltung

Fundamentale Wechselwirkungen

Es gibt vier Grundkräfte in der Physik: Gravitationskraft, Elektromagnetische Wechselwirkung, Schwache Wechselwirkung und Starke Wechselwirkung. Sämtliche physikalische Prozesse können auf diese Grundkräfte zurückgeführt werden. In Tab. 4 wird ein Vergleich der vier Grundkräfte angestellt. Es kann darüber diskutiert werden, ob es sich dabei um eine Analogie handelt, da eine intuitive Erfassbarkeit dieser Grundkräfte schwer möglich ist. Durch die Gegenüberstellung der fundamentalen Wechselwirkungen in Physik, wird die Vernetzung dieser Teilbereiche aufgezeigt.

Grundkraft	Austauschteilchen	Relative Stärke	Reichweite [m]	Ladung
Gravitation	Graviton (postuliert)	10^{-41}	∞	Masse
Elektromag. WW	Photon	10^{-2}	∞	elektr. Ladung
Schwache WW	W^+, W^-, Z^0	10^{-15}	$< 10^{-15}$	-
Starke WW	Gluon	1	$\sim 10^{-15}$	Farbladung

Tab. 5 – Die vier Grundkräfte in der Physik.

Strom- und Wasserkreislauf

Die Strom- und Wasserkreislaufanalogie wurde erstmals von Schwedes und Dudeck (1993) publiziert. Wie in Abschnitt 3 angeführt, be-

zieht sich dieser Vergleich auf alle drei Dimensionen der Analogien(O, M, E).Der Wasserkreislauf wird demnach verwendet, um Vorgänge im elektrischen Stromkreis zu veranschaulichen. Der primäre Lernbereich (elektrischer Stromkreis) wird über Umwege durch den Wasserkreislauf erfasst. Eine Gegenüberstellung ist in Tab. 5 ersichtlich.

Die Vertrautheit der Lernenden mit Wasser und die formal gleichen Gesetze in beiden Realitätsbereichen sind Hauptgründe, die für die Verwendung dieser Analogie sprechen.

Wasserkreislauf	Stromkreislauf
Pumpe	Spannungsquelle
Höhenabfälle (oder Druckabfall)	Widerstände
Wasserdurchfluss	Ladungsfluss
Relative Höhe	Spannung
Absolute Höhe (m ü. Adria)	Absolutes Potential zum Erdpotential

Tab. 6 – Die Wasseranalogie in Bezug zum elektrischen Stromkreis

5 Zusammenfassung

Es besteht ein allgemeiner Konsens in der Fachdidaktik, dass geeignete Analogien gewinnbringend im Unterricht implementiert werden können. Besonders häufig finden sich strukturelle und inhaltliche Zusammenhänge, diese können ein konzeptionelles Verständnis der Physik aufbauen und ein vernetztes Wissen schaffen (Krause, 2013). Analogien können beispielsweise als Einstieg in einen neuen Themenbereich verwendet werden, um ein vorläufiges Verständnis zu fördern (Kircher et al., 2014). Analogien dürfen im Unterricht nicht vorbehaltlos eingesetzt werden. Grenzen von Analogien müssen aufgezeigt werden. Bei komplexen Zusammenhängen, beispielsweise in der modernen Physik, steht die Lehrperson vor einer scheinbar unlösbaren Dichotomie: Damit der Analogieversuch für ein besseres Verständnis sorgt, muss dieser einfach aufgebaut sein. Bei zu starker Simplifizierung und Elementarisierung können jedoch falsche Assoziationen bei Schüler/Innen hervorgerufen werden

(Krause, 2014). Sprachliche, bildhafte und strukturelle Vergleiche sind hingegen unproblematisch und können den Lernprozess unterstützen (Kircher et al., 2014). Besonders fordernd erscheint die Aufgabe, Analogien zu finden, die physikalische Denkprinzipien vermitteln und als Lösungswerkzeug eingesetzt werden. In der Literatur wird der Mehrwert von Analogien aus didaktischer und pädagogischer Sicht ausreichend beleuchtet, konkrete schultaugliche Beispiele besitzen jedoch einen Seltenheitswert. Auf struktureller und inhaltlicher Ebene wurden einige Beispiele erläutert. Ob die vorgestellten Analogien lernwirksam sind, muss in weiterführenden Studien untersucht werden.

6 Literatur

- Apolin, M. (2008). *Big Bang : [Physik]. 7. Physik: ÖBV.*
- Bauer, F., & Richter, V. (1986). Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Analogien und Analogieschlüssen. *Ph. i. d. Sch, 18*, 384-386.
- Berger, R., Wiesner, H., Hopf, M., Girwidz, R., Heering, P., Höttecke, D., Name! Leisen, J. (2011). *Physikdidaktik kompakt: Aulis-Verlag.*
- Duit, R., & Glynn, S. (1995). Analogien-Brücken zum Verständnis. *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik, 6(27)*, 4-10.
- Gentner, D. (1989). Analogical learning. *Similarity and analogical reasoning*, 199.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2014). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis: Springer, Berlin, Heidelberg.*
- Kircher, E., & Hauser, W. (1995). Analogien zum Spannungsbegriff in der Hauptschule. *NiU-Physik, 27(3)*, 18-22.
- Klinger, W. (1987). Die Rolle der Analogiebildung bei der Deutung physikalischer Phänomene. *Didaktik der Physik. DPG*, 326-333.
- Krause, E. (2013). Physikalisches Denken - Wege zur Vermittlung konzeptionellen Verständnisses der Physik. *PhyDid B - Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.*
- Krause, E. (2014). Analogien im Physikunterricht-Warum Analogien in der Physik mehr sind als nur allgemeine heuristische Prinzipien. *PhyDid B - Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.*
- Manthei, W. (1992). Das Analogische im Physikunterricht. *Ph. i. d. Sch., 30*, Heft 7/8, 250-256.
- Schwedes, H., & Dudeck, W. (1993). Lernen mit der Wasseranalogie. *NiU/P, 4(1)*, 16-23.
- Tiemann, A. (1993). *Analogie: Analyse einer grundlegenden Denkweise in der Physik: Deutsch.*
- Wagenschein, M. (1970). Ursprüngliches Denken und exaktes Verstehen, 2 Bde. Klett, Stuttgart. Whitehead, A. N. (1952). *The aim of education and other essays: New American Library.*