



## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

<p>GEFÖRDERT VOM</p>  <p><b>Bundesministerium für Bildung und Forschung</b></p>	<p>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (ehem. Bundesministerium für Bildung und Forschung) unter den Förderkennzeichen 16INB2010 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem/der Autor:in bzw. den Autor:inn:en.</p>
 <p><b>Finanziert von der Europäischen Union</b> NextGenerationEU</p>	<p>Dieses Vorhaben wurde auch finanziert durch Mittel der Europäische Union – NextGenerationEU. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die des Autors/der Autorin/der Auro:inn:en und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten der Europäischen Union oder der Europäischen Kommission wider. Weder die Europäische Union noch die Europäische Kommission können für sie verantwortlich gemacht werden.</p>

Teil I: Kurzbericht

## Ursprüngliche Aufgabenstellung, der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde

In der Bekanntmachung zur Nationalen Bildungsplattform vom April 2021 heißt es:

*„Lernenden in allen Altersstufen soll ermöglicht werden, sich unterstützt durch digitale Services durchlässig und medienbruchlos durch die verschiedenen Bildungsangebote und Bildungsformen zu bewegen und diese in digital unterstützten Lernräumen zu nutzen.“*

Ein strukturelles Hindernis auf dem Pfad zu diesem Ziel ist das Fehlen einer Web-basierten, effektiven Schnittstelle, die digitalen Bildungsangeboten eine Interoperabilität ermöglicht. Schnittstellen dieser Art werden in der Informationstechnologie als „Ontologie“ bezeichnet.

Ontologien spielen in der Bildung eine zunehmend wichtige Rolle, weil sie Wissen strukturieren, maschinenlesbar machen und damit Lernprozesse, Wissensvermittlung und -organisation unterstützen können. Sie schaffen eine formale, eindeutige Beschreibung von Begriffen und deren Beziehungen. Damit können Themengebiete (z. B. die Mathematik der Sekundarstufe II) systematisch abgebildet und miteinander verknüpft werden.

Sie bilden damit die epistemologische Grundlage für ein formales Modell von Wissen: sie definieren Konzepte, Relationen und Axiome in einem bestimmten Fachgebiet und stehen so im Spannungsfeld zwischen Wissensrepräsentation (Informatik, zum Teil KI) und Didaktik (Bildungstheorie). Sie helfen dabei, Lerninhalte semantisch zu erschließen, anstatt nur über Schlagworte.

So können Ontologien von Lernplattformen genutzt werden, um Lerninhalte an den Wissensstand der Lernenden anzupassen oder individuelle Lernpfade zu erstellen, weil sie Abhängigkeiten und Vorkenntnisse klar darstellen. Sie können Bildungsressourcen verschiedener Anbieter – auch staatlicher Stellen - interoperabel machen und dadurch leichter kombiniert, wiederverwendet und automatisiert empfohlen werden.

Insbesondere für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Bildung bieten Ontologien eine methodische Grundlage: so können Intelligente Tutoring-Systeme oder Chatbots sie nutzen, um Fragen der Lernenden zu verstehen und kontextgerecht zu beantworten.

Das Projekt CoKoMo hat dabei an Ergebnisse von US-amerikanischen Kognitionswissenschaftlern wie Frederick Reif (\*1927, †2019) und Instruktionsdesignern wie Alexander J. Romiszowski (\*1939) angeknüpft. Diese haben die theoretischen Grundlagen geliefert, um Lernen als einen Prozess der Wissensorganisation zu erkennen und zu modellieren. Moderne Ontologien in der Bildung sind damit eine formale Umsetzung dieser Ideen – sie übersetzen kognitionswissenschaftliche Ansätze in maschinenlesbare Strukturen. Durch ihre Systematisierung von Wissensarten und Bedeutungszusammenhängen können sie zur Entwicklung von ontologiebasierten Bildungsmodellen und Bildungs-IT-Systemen genutzt werden. Romiszowski beschäftigte sich dafür intensiv mit der Frage: Welche Arten von Wissen gibt es und wie müssen diese didaktisch behandelt werden? Er unterschied ähnlich wie Reif zwischen Faktenwissen, Konzeptwissen, prozeduralem Wissen und Problemlösewissen. Diese Unterscheidungen wurden in späteren Educational Ontologies und in CoKoMo direkt aufgegriffen, um Konzepte, Relationen und Kompetenzen formal zu modellieren.

Für die prototypische Implementierung der Arbeiten von Reif und Romiszowski ist es Gilbert Paquette (\*1942), der eine technische Implementierung in einer Software vollzieht. An seinen Forschungsinhalten hat sich die Arbeit von CoKoMo orientiert. Paquette ist durch seine Arbeiten zu Knowledge Management Software und ontologiebasierten Lernsystemen bekannt geworden, für die Reif die kognitionswissenschaftliche Begründung und Romiszowski die didaktische Systematisierung lieferte. Paquette sah Ontologien als Mittel, um Wissen explizit, strukturiert und digital abbildbar zu machen. Seine Software zielte auf Adaptive Lernsysteme (automatische Anpassung von Inhalten an den Wissensstand), Wissensintegration (Zusammenführung heterogener Quellen) und Interoperabilität (gemeinsame semantische Sprache für verschiedene Systeme) ab. Paquette sah Ontologien als Mittel, um Wissen dafür explizit, strukturiert und digital abbildbar und aufrufbar zu machen.

Paquets Software greift dabei Reifs Erkenntnis auf, dass Lernende Wissen oft fragmentiert erwerben. Ontologien in der Software wirken diesem Problem entgegen, indem sie kohärente Strukturen bereitstellen. Gleichzeitig knüpfte Paquette an Romiszowskis Instructional Design Modelle an, indem er Ontologien zur Curriculum- und Kompetenzmodellierung nutzte.

## Ablauf des Vorhabens

Diese drei Pfeiler

1. die kognitionswissenschaftliche Begründung (Wissen muss strukturiert sein) durch Reif,
2. die didaktische Begründung (Wissen muss systematisch klassifiziert sein) durch Romiszowski und
3. die technologische Umsetzung (Ontologien als Software-Architektur) durch Paquette

bilden schließlich die Grundlagen für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt CoKoMo. Die Herausforderung für die Erreichung der Ziele des Vorhabens bestand vor allem daran, die Strukturen und Erkenntnisse der genannten Wissenschaftler für den Einsatz in einer Bildungsplattform zu konzipieren, die dezentral, interoperativ und einfach genug für die Nutzung unterschiedlicher Anwendergruppen, wie z.B. IT-Entwickler und IT-Entwicklerinnen sowie Lehrerinnen und Lehrer, ist.

Die Software CoKoMo ist somit die wissenschaftliche Integration und Implementierung sowie schließlich die praktische Konkretisierung dessen, was Reif und Romiszowski theoretisch vorbereitet haben und Paquette in seinen proprietären und stand-alone Software-Applikationen angedacht hat. CoKoMo übersetzte also deren Ideen in eine Grundlage für funktionierende, ontologiebasierte Werkzeuge wie E-Learning-Systeme, Wissensgraphen und Lernmanagement-Systeme. Die Ontologie CoKoMo soll so ein zentraler Baustein in der Bildungstechnologie des Bundes und der Länder der Bundesrepublik Deutschland werden, über den Lernziele, Lernergebnisse, Inhalte, Methoden und Medien miteinander vernetzt werden.

Zu Projektbeginn stand deshalb zunächst die Aufgabe, eine Blaupause für ein effiziente, digitale Bildungsproduktion der Zukunft in Deutschland zu entwerfen – als Strukturen und Prozesse, die auf funktionierende, ontologiebasierte Werkzeuge zurückgreifen und damit Grundlage für eine Vielzahl von unterschiedlichen Typen von Lernmanagement-Systeme bilden. Dafür wurden eine Reihe von alternativen Value-Networks entwickelt. Sie zeigen, welche Institutionen und Unternehmen heute und in Zukunft an der Bildungsproduktion beteiligt sein könnten und wie sie dafür Daten und Informationen effizient austauschen müssen – mit CoKoMo als Ontologie-Schnittstelle.

## Wesentliche Ergebnisse

CoKoMo besteht aus einem Graphical-User-Interface – für die Erzeugung des Wissens-Modells – und einem public Application-Programming-Interface (API) – für IT-Dienste. Zentrale Ergebnisse für den Bildungsmarkt der Zukunft sind dabei folgende:

- die Dokumentation von Zukunftsszenarien für interoperative, B2B Anwendungen in der Bildungsproduktion: dazu gehört die Erfassung von Akteuren und Organisationen sowie deren Interaktion in einem Value Network.
- die prototypische Web-Applikation CoKoMo, basierend auf einem Graphenmodell mit typisierten Knoten und gerichteten Kanten, deren Knoten durch Lernziele unterschiedlicher Kompetenzstufen spezifiziert sind.



Die Ergebnisse und die Dokumentation zeigen, wie CoKoMo in der Praxis genutzt werden kann. Dafür wurden die zwei prototypischen Web-Anwendungen

1. zur Formulierung eines Curriculums und
2. zur Dokumentation eines persönlichen, individuellen Bildungsstandes

als Proof of Concept erstellt.

Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben CoKoMo hat während der Projektlaufzeit eine Reihe von Workshops mit dem Projekt „Maverick“ durchgeführt. CoKoMo steht außerdem im informellen Kontakt mit der FwU zum deren Projekt [MEM – Metadaten für Bildungsmedien](https://fwu.de/projekte/mem/) (<https://fwu.de/projekte/mem/>).

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

<p>GEFÖRDERT VOM</p>  <p><b>Bundesministerium für Bildung und Forschung</b></p>	<p>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (ehem. Bundesministerium für Bildung und Forschung) unter den Förderkennzeichen 16INB2010 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem/der Autor:in bzw. den Autor:inn:en.</p>
 <p><b>Finanziert von der Europäischen Union</b> NextGenerationEU</p>	<p>Dieses Vorhaben wurde auch finanziert durch Mittel der Europäische Union – NextGenerationEU. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die des Autors/der Autorin/der Auro:inn:en und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten der Europäischen Union oder der Europäischen Kommission wider. Weder die Europäische Union noch die Europäische Kommission können für sie verantwortlich gemacht werden.</p>

## Teil II: Eingehende Darstellung

Dies ist der fachliche Sachbericht, in dem die Durchführung des Vorhabens und die Erreichung der Projektziele dargestellt sind.

## Inhalt

Sachbericht zum Verwendungsnachweis.....	1
Teil II: Eingehende Darstellung .....	1
Aufgabenstellung.....	3
Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde: von der Kognitionswissenschaft zur Ontologie - eine Entwicklungslinie in Bildung und E-Learning.....	4
Frederick Reif: Kognitionswissenschaft und Wissensorganisation .....	4
Alexander Romiszowski: Didaktische Systematisierung .....	5
Gilbert Paquet: Ontologien in der Software .....	5
Heutige Ontologien in Bildung und E-Learning .....	6
Umsetzung des Vorhabens – auch im Vergleich zur ursprünglichen Planung.....	6
Ergebnisse des Vorhabens .....	7
Standardisierung als „Enabler“ .....	9
Warum ein Standard für Wissen gebraucht wird.....	9
Curricula, Lernobjekte, Suchmaschinen, Lernende – alle beziehen sich auf „Wissen“ .....	10
Anforderungen an ein Modell für Wissen – gestern, heute und morgen.....	11
Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	12
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	13
Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	13
Begriffe und Bedeutungszusammenhänge .....	15
Kompetenz: die Tiefendimension .....	16
Ist CoKoMo das richtige Wissensmodell? .....	16
Prototypische Anwendungen.....	18
Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	19
Zur internationalen Standardisierung von Informationstechnologie zum Lernen .....	20
Zur Implementierung von innovativen Informationsmodellen im E-Learning.....	21
Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF BMBF-Vordr. 0701/12.22 .....	23
Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung .....	23
Literaturverzeichnis .....	23

## Aufgabenstellung

CoKoMo2 stellt eine Ontologie als standardisierende Schnittstelle zwischen Institutionen der Bildung zur Verfügung. Sie verfolgt den zentralen und motivationsstiftenden Kern der Nationalen Bildungsplattform / meinBildungsraum:

*Lernenden in allen Altersstufen soll ermöglicht werden, sich unterstützt durch digitale Services durchlässig und medienbruchlos durch die verschiedenen Bildungsangebote und Bildungsformen zu bewegen und diese in digital unterstützten Lernräumen zu nutzen. Ein solcher digital unterstützter Bildungsraum ermöglicht Zugang sowie die personalisierte und aus aktuellen Lebenslagen heraus optimierte individuelle oder kooperative Nutzung, Integration und Verknüpfung von formalen, nonformalen und informellen Lehr- /Lernmöglichkeiten. Dies umfasst auch das Recht und die Funktionen dafür, die eigenen Daten souverän und selbstbestimmt zu verwalten und zur Verfügung stellen zu können. Das bezieht sich auf die Lernfortschrittsdokumentation ebenso wie das Abbilden der (formalen) Kompetenzen in Form von Badges, Zeugnissen usw., über deren Nutzung und Disposition durch ihre Inhaberinnen und Inhaber verknüpft mit der eigenen digitalen Identität souverän und selbstbestimmt entschieden werden kann.*

*Durch darauf aufsetzende Servicenangebote wird die Navigation durch den digitalen Dschungel erheblich vereinfacht und es wird besser möglich, originäre Bildungs- aber auch Unterstützungsangebote individuell auf die Nutzerinnen und Nutzer zuzuschneiden. Transparenz wird ebenso erhöht wie Teilhabemöglichkeiten an Lehr-/Lernräumen mit Bildungsangeboten aller Sektoren. Prozesse werden nutzerzentriert abgebildet und seitens der involvierten Institutionen untereinander interoperabel.*

Auf der Grundlage dieser Anforderungen nimmt CoKoMo den Ausgangspunkt seiner Forschungsfragen in der Didaktik. So lautet die übergeordnete Frage aus der Konzeptphase:

- Welche Beschreibungsform muss die CoKoMo Ontologie annehmen, um die Anforderungen der Bildungsplattform zu erfüllen?

Dabei wird die klassische Taxonomie mit 6 Stufen nach Anderson / Krathwohl (vgl. [3] und [8]) zur Quantifizierung von Kompetenz übernommen und die Forschung in diesem Vorhaben fokussiert ganz auf die qualitative Modellierung in einem semantischen Netz. CoKoMo verfolgt dabei den Ansatz, dies über ein Resource Description Framework zu implementieren. Er liefert ein Wissensmodell, das deutlich stärker strukturiert ist, als vergleichbare Initiativen. Aussagen werden hierbei im RFD „Triple“ aus Subjekt, Prädikat und Objekt ausformuliert. Dies wird in Abschnitt „Begriffe und Bedeutungszusammenhänge“ erläutert. Die drei Forschungsfragen aus der Konzeptphase bleiben bestehen. Dies sind

1. Die Ontologie bietet im Moment drei Typen von Competence-Bases (Knoten): Konzept, Prozess und Prinzip. Sind diese hinreichend für eine valide Abbildung der Wissens Elemente der Fachdomänen?

2. Die Ontologie bietet momentan sechs Typen von Competence-Relations (Kanten). Sind diese ausreichend für eine valide Abbildung der Bedeutungszusammenhänge zwischen den Knoten?
3. Welche Knoten- oder Kanten-Typen fehlen ggf. bei der Implementierung von Wissensdomänen?

Aus den Diskussionen mit Projekten der Nationalen Bildungsplattform hat sich eine weitere Forschungsfrage entwickelt, die den Nutzen der Ontologie für Produktivsysteme adressiert:

4. Wie können in einer Welt mit N Kompetenzframeworks diese miteinander synchronisiert werden?

Hier wird durch die Zuordnung von Elementen unserer Ontologie zu den anderen Frameworks gezeigt werden, wie z.B. Inhalte von Lehrplänen verschiedener Bundesländer und Schulformen verknüpft werden können.

Die Beantwortung der Forschungsfragen soll dabei die maschinelle Unterstützung für Bildungsorganisationen in der Umsetzung – vor allem für Produktivsysteme – mitdenken, also z.B. die Themen User Experience, Unterstützung für „Nicht-Nerds“, grafische Navigation durch die Ontologie, Lernpfadgenerierung, Chat Bots und Intelligent Tutoring Systems.

Dabei spielt der intendierte Lernprozess eine große Rolle.

## Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde: von der Kognitionswissenschaft zur Ontologie - eine Entwicklungslinie in Bildung und E-Learning

Die Entwicklung moderner Ontologien in der Bildung ist nicht isoliert zu verstehen, sondern in eine längere wissenschaftliche Tradition eingebettet. Drei Wissenschaftler markieren dabei zentrale Aspekte: Frederick Reif, Alexander Romiszowski und Gilbert Paquet. Während Reif die kognitionswissenschaftlichen Grundlagen lieferte, systematisierte Romiszowski didaktische Modelle, und Paquet übersetzte diese Theorien in konkrete Softwarelösungen. Heute finden sich ihre Ideen in den Ontologien wieder, die als Rückgrat von E-Learning-Systemen, Kompetenzmodellen und Wissensgraphen fungieren. Der folgende Abschnitt zeichnet diese Entwicklung nach.

### Frederick Reif: Kognitionswissenschaft und Wissensorganisation

Frederick Reif gilt als einer der Pioniere der „Cognitive Science of Science Education“ (vgl. [46] und [47]). Sein wissenschaftlicher Fokus lag auf der Frage, wie Wissen im menschlichen Gehirn organisiert ist und wie Lernende es strukturieren. Reif unterschied dabei zwischen deklarativem Wissen (Fakten, Konzepte) und prozeduralem Wissen (Handlungs- und Problemlösestrategien). Diese Differenzierung ist heute grundlegend für die Modellierung in Ontologien, die ebenfalls Konzepte und Prozesse formal abbilden.

Reifs zentrale Erkenntnis war, dass Lernen häufig daran scheitert, dass Wissen fragmentiert, inkohärent und nicht hinreichend systematisiert ist. Lernende entwickeln isolierte Wissensinseln, die sie nicht sinnvoll miteinander verknüpfen können. Aus didaktischer Sicht bedeutet das, dass Bildung nicht nur die Vermittlung von Fakten beinhalten darf, sondern die Förderung einer kohärenten Wissensorganisation. Reifs Forschung bereitete damit den Boden für Ansätze, die Wissen als Netzwerk von Konzepten und Relationen verstehen – eine Sichtweise, die später in Ontologien technisiert wurde.

Ein weiterer Beitrag Reifs war die Betonung der externen Repräsentationen. Er argumentierte, dass wissenschaftliches Wissen nur dann leistungsfähig wird, wenn es in Modellen, Symbolsystemen und Diagrammen externalisiert wird. Genau diese Forderung nach expliziten Strukturen findet sich in modernen Ontologien wieder, die Wissen maschinenlesbar, wiederverwendbar und transparent abbilden.

### Alexander Romiszowski: Didaktische Systematisierung

Während Reif auf der Ebene der Kognitionswissenschaft arbeitete, verfolgte Alexander J. Romiszowski einen didaktisch-systemischen Ansatz (vgl. [49]). Er ist einer der wichtigen Vertreter des Instruktionsdesigns und beschäftigte sich mit der Frage, wie Lerninhalte, Lernziele, Methoden und Medien systematisch aufeinander abgestimmt werden können.

Romiszowski entwickelte Klassifikationen von Wissensarten, die stark an Reifs Unterscheidungen erinnern. Er unterschied zwischen Faktenwissen, Konzeptwissen, prozeduralem Wissen und Problemlösefähigkeiten. Diese Differenzierung wurde später von Ontologie-Entwicklern übernommen, um Bildungsinhalte zu formalisieren und in adaptive Systeme zu überführen.

Ein zentraler Gedanke Romiszowskis ist, dass Curricula nicht linear, sondern netzwerkartig organisiert sein müssen. Lernende bewegen sich je nach Vorwissen und Motivation auf unterschiedlichen Pfaden durch den Lernstoff. Damit antizipierte er eine Grundidee, die heute in Ontologien verwirklicht wird: Bildung als semantisches Netz von Konzepten, in dem Lernpfade dynamisch abgeleitet werden können.

Seine Instruktionsdesign-Modelle stellten eine Brücke zwischen Bildungswissenschaft und Technologie dar. Sie gaben ein theoretisches Gerüst, das Ontologien später technisch umsetzen konnten: die systematische Verknüpfung von Lernzielen, Inhalten und Medien.

### Gilbert Paquet: Ontologien in der Software

Während Reif und Romiszowski theoretische Grundlagen legten, brachte Gilbert Paquet den entscheidenden Schritt in die informationstechnologische Praxis. Er entwickelte Softwarelösungen, die Ontologien als Strukturierungsprinzip nutzten, um Wissen digital verfügbar zu machen.

Paquet verstand Ontologien als Instrumente zur Wissensintegration, Interoperabilität und Personalisierung (vgl. [42]). Seine Software zielte darauf, Bildungsinhalte adaptiv bereitzustellen, heterogene Wissensquellen zu verbinden und Lernsysteme interoperabel zu gestalten. Damit setzte er technisch um, was Reif als kognitives Problem und Romiszowski als didaktische Anforderung beschrieben hatten.

Ein Beispiel: Während Reif zeigte, dass fragmentiertes Wissen ein Lernhindernis ist, bot Paquets Software eine Lösung, indem sie Lerninhalte über ontologische Strukturen kohärent verknüpfte. Und während Romiszowski betonte, dass Curricula netzwerkartig angelegt sein müssen, implementierte Paquet genau diese Netzwerklogik in seiner Software.

## Heutige Ontologien in Bildung und E-Learning

Heute sind Ontologien ein zentrales Element von Bildungstechnologien. Sie bilden die Grundlage für:

- Adaptive Lernsysteme, die individuelle Lernpfade generieren.
- Kompetenzmodelle, die Lernziele mit Wissensstrukturen verknüpfen.
- Wissensgraphen, die große Mengen an Bildungsressourcen semantisch durchsuchbar machen.
- Learning Analytics, die Lernprozesse auf Basis semantischer Modelle analysieren.

In Standards wie IEEE Learning Object Metadata oder IMS Learning Design zeigt sich deutlich der Einfluss der theoretischen Vorarbeiten. Ontologien ermöglichen es, Lernobjekte formal zu beschreiben, Kompetenzen zu modellieren und Bildungsangebote interoperabel zu gestalten.

Damit schließt sich der Kreis: Reifs kognitive Forderung nach kohärenter Wissensorganisation, Romiszowskis didaktische Forderung nach systematischer Strukturierung und Paquets technologische Umsetzung führen direkt zu den Ontologien, die heute E-Learning und digitale Bildung prägen.

Die Entwicklungslinie von Reif über Romiszowski zu Paquet zeigt, dass Ontologien in der Bildung nicht als rein technische Erfindung verstanden werden können. Sie sind das Ergebnis einer langen theoretischen Tradition, die von der Kognitionswissenschaft über die Didaktik bis hin zur Softwareentwicklung reicht. Heutige Ontologien im E-Learning sind damit sowohl eine kognitive Antwort auf das Problem fragmentierten Wissens, eine didaktische Antwort auf die Notwendigkeit systematischer Curricula als auch eine technologische Antwort auf die Herausforderungen digitaler, dezentrale Bildung.

## Umsetzung des Vorhabens – auch im Vergleich zur ursprünglichen Planung

Folgende Arbeitspakete wurden bearbeitet:

- AP 1 Implementierung technischer Funktionen für den Web-Service
- AP 2: Management der Anforderungen
- AP 3 Blaupause der Organisation
- AP 4 Transfer / Publikation

Alle Arbeitspakete wurden wie geplant umgesetzt. Dabei waren die Arbeiten zu Anforderungserhebung (Value-Network) und ihre Umsetzung des Meta-Modells in den AP 1

“Implementierung technischer Funktionen des Ontologie-Servers” und AP 2 “Management der Anforderungen” eng aufeinander abgestimmt.

Ebenso verhielt es sich bei den AP 3 “Organisation/nachhaltige Verankerung” und AP 4 “Transfer/Publikation”, bei denen ebenfalls die Value-Networks aber auch die Prototypen und verschiedene Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und Ergebnisdissemination (u.a. Bereitstellung zur freien Nutzung, Mitarbeit im DIN, Gespräche mit verschiedenen Akteursgruppen) erfolgreich umgesetzt wurden.

Die Anforderungen einer Bildungsplattform an die CoKoMo-Ontologie ergeben sich aus einer Prozess-Analyse der heutigen Bildungsproduktion. Die zentrale Erkenntnis im Projektverlauf war, dass Bildungsinhalte fast ausschließlich informell definiert und übergeben werden: die Inhalte können nur Menschen „verstehen“, ihre Beschreibung ist nicht maschinenlesbar und kann nicht automatisiert bearbeitet werden.

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts CoKoMo ist es deshalb, eine passende Ontologie als zentrale Schnittstelle und „Enabler“ in Form eines voll funktionsfähigen Prototypen bereitzustellen. Die zentrale Herausforderung im Projektverlauf bestand darin, eine zukünftige, digitale Bildungslandschaft entsprechend den Anforderungen der Nationalen Bildungsplattform / Mein Bildungsraum mit Ihren Prozessen und Datenstrukturen zu antizipieren.

Denn damit Lernende die digitalen Services - wie verschiedene Bildungsangebote und Bildungsformen - durchlässig und medienbruchlos nutzen können, müssen sie zwischen unterschiedlichen digital unterstützten Lernräumen wechseln können. Die CoKoMo-Ontologie muss diesen Zugang sowie die intendierte personalisierte individuelle oder kooperative Nutzung, Integration und Verknüpfung von Lehr- /Lernmöglichkeiten unterstützen.

Die zu unterstützenden Anforderungen der zukünftigen Bildungsplattform umfassen dabei u.a. die Lernfortschrittsdokumentation ebenso wie das Abbilden der (formalen) Kompetenzen in Form von Badges, Zeugnissen usw. sowie darauf aufsetzende Servicenangebote. Prozesse müssen dazu nutzerzentriert abgebildet und seitens der involvierten Institutionen untereinander interoperabel sein.

Wie im Antrag des Vorhabens beschrieben, nahm deshalb die Spezifikation und detaillierte Dokumentation der Anforderungen an die Ontologie einen erheblichen Raum ein. Inhaltlich und sachlich wurde das Vorhaben dabei wie geplant umgesetzt.

Änderungen in der Umsetzung des Vorhabens ergaben sich aus der Verfügbarkeit und Fluktuation von Mitarbeitern, die eine Mittelumwidmungen erforderte.

## Ergebnisse des Vorhabens

Damit Deutschland in der digitalen Bildungsproduktion eine Rolle spielen kann, braucht es die Kooperation von Einzelunternehmen und Open-Source Komponenten, die ihre jeweils besten Beiträge zu persönlichen Lernprozessen liefern können. Diese Kooperation erfordert eine leistungsfähige, zukunfts offene Schnittstelle.

Das will CoKoMo sein.

So bietet CoKoMo mit seinen IDs für Lernziele und deren Bedeutungszusammenhänge die Grundlage für zukünftige, langfristige und strategische Entwicklungen von kooperativen E-Services in der Bildung.

Es gilt also nicht nur, ein konkretes, z.B. technisches Problem, zu lösen. Es wird hier nach einer grundlegenden Herangehensweise gefragt, die einen innovativen, neuen Technologiezweig – die Bildungsproduktion – in die Lage versetzt, computergestützte Dienstleistungen zu entwickeln und zu vermarkten.

Diese Aussage stellt nicht die Innovationskraft heutiger kommerzieller Anbieter oder solcher des Non-Profit-Sektors mit Ihren Web-Portalen speziell im Nachhilfebereich infrage. Aus Sicht des Projekts CoKoMo soll öffentliche Bildung allerdings nicht ausschließlich auf Insellösungen mit inkompatiblen Formaten für Lernobjekten und Wissensmodellierungen basieren. Gesucht ist vielmehr ein Gedeihraum, in dem viele kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) neue, dezentrale Dienstleistungen zu schulischer und universitärer Bildung anbieten können. Und der gleichzeitig den transparenten Zugang für open-source Inhalte oder Algorithmen ermöglicht. Dass dies im Moment noch nicht möglich ist, hat ökonomische und organisatorische Gründe.

Hier soll aus Sicht der Organisation des Bildungsmarktes die Frage geklärt werden:

- Welche strukturellen Maßnahmen helfen, die Hindernisse für einen dezentralen, offenen EduTech-Markt zu überwinden?

Anbieter im eLearning sind heute erfolgreich, wenn sie Komplettlösungen für ein spezielles Problem – z.B. Nachhilfe für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II im Fach Mathematik (für Gymnasien im Bundesland Hamburg) - anbieten. Und diese Angebote sind oft von sehr hoher Qualität. Da Lerninhalte, Analyseverfahren, Lehrinterventionen, User-Experience und individuelle Lernstände aber in einer Insellösung gekapselt sind, ist ein Austausch mit dem staatlichen Bildungssystem und ihren Einrichtungen oft schwierig und funktioniert nur als „Einbahnstraße“ vom Anbieter hin zur Schule. Aus Sicht von CoKoMo2 braucht öffentliche Bildung aber eine offene Bildungslandschaft.

Dieses Anliegen hat sowohl ökonomische also auch strukturelle Aspekte. Es läuft auf die Frage hinaus: wie kann ein Start-Up-Unternehmen am Markt erfolgreich sein, ohne Bildung komplett selbst neu zu erfinden?

Eine solche Herausforderung hat Deutschland in einem anderen Kontext eine nachhaltige Erfolgsgeschichte beschert: die Entstehung von vielen KMUs in der Industrialisierung auf der Grundlage von Normen. Für diesen Paradigmenwechsel entwickelte Deutschland im angehenden 20ten Jahrhundert ein Rahmenwerk von klar definierten Schnittstellen. Damit konnten Waren und Dienstleistungen wie Schrauben und Muttern (DIN EN ISO 225, vgl. [18]) oder Prozesse zum Qualitätsmanagement (DIN EN ISO 9000) reibungsfrei zwischen Personen und Unternehmen ausgetauscht werden. Ein Unternehmen, das Schrauben und Muttern herstellt, kann diese an viele Interessenten verkaufen. Unter der Position „Sechskantschraube mit Schaft DIN 931 A2, M 5 x 40“ verstehen dann Kunde und Lieferant exakt das gleiche.

Dem deutschen Bildungsmarkt fehlen aus Sicht von CoKoMo genau diese normierten Schnittstellen, um einen teilweise marktwirtschaftlich-ökonomisch organisierten EduTech-Bereich zu entwickeln.

## Standardisierung als „Enabler“

Im Projekt CoKoMo2 wurde deshalb gleich zu Beginn des Projekts ein Value-Network erarbeitet: ein Netzwerk von Stakeholdern – existierende wie zukünftige – mit den zwischen ihnen ausgetauschten Mehrwerten. Dabei wurde klar: ohne eine normative Schnittstelle für das, was wir „Wissen“ nennen, funktioniert ein offener Bildungsmarkt nicht gut.

Dabei verwendet CoKoMo2 den Begriff „Wissen“ als eine möglichst eindeutige Erfassung eines Lernziels. Ein Beispiel:

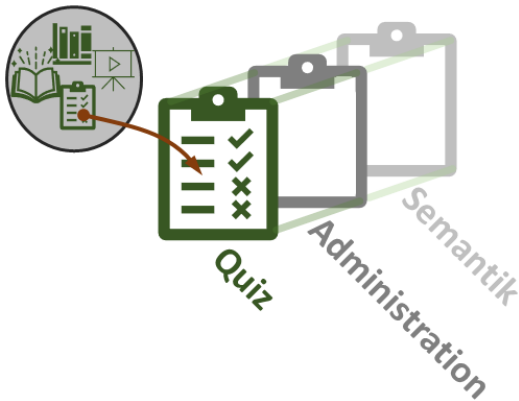


Bild 1: Metadaten für Lernobjekte

In einem Katalog von Lernobjekten (Videos, Bücher, Tests, ...) gibt es ein Quiz zum Thema „Quadratische Gleichungen“. Damit das Lernobjekt außerhalb eines festen Kontextes gefunden und wiederverwendet werden kann, muss es mit maschinenlesbaren Metadaten auf einem administrativen Layer („wurde erstellt von“, „ist vom Typ Quiz“, „ist im Moodle XML format“, ...) und einem semantischen Layer („Das Quiz testet das Lernziel >ich kann quadratische Gleichungen mit reell-wertigen Koeffizienten mit der p-q-Formel lösen<“) verknüpft werden.

Für den administrativen Layer gibt es De-facto-Standards wie z.B. AMB, basierend auf LRMI und schema.org (vgl. [2], [27], [50]), oder Ansätze für De-jure-Standard wie im deutschen Normenausschuss NA 043-01-36 AA "Lerntechnologien" für die ISO-IEC 19788-1.

Was es noch nicht oder noch nicht passend gibt sind Metadatenstandards für die semantische Erfassung von Wissens-elementen. Das bietet CoKoMo.

Traditionell wird Semantik über Begriffe transportiert. Also über „Quadratische Gleichungen“ im Beispiel oben. Diese informelle und unscharfe Adressierung von Wissen ist allerdings im Zusammenhang mit Computeranwendungen ineffizient.

## Warum ein Standard für Wissen gebraucht wird

Die Suche nach einem Begriff – z.B. „Quadratische Gleichungen“ - liefert bei einer Suche im Internet die Inhalte, die durch eine Suchmaschine mit dem Begriff assoziiert werden. In der Informatik nennt man eine Darstellung von Begriffen und deren Beziehungen zueinander eine „Ontologie“, im obigen Beispiel in seiner einfachsten Form als lose Begriffssammlung.

Das Problem mit Begriffen beginnt bei der Unschärfe der Abgrenzung des Begriffs zu seinen Nachbarn. Ist mit „Quadratische Gleichung“ wirklich die Gleichung – als Gleichung, bei der die linke Seite ein Polynom 2-ten Grades mit reell-wertigen Koeffizienten und der rechten Seite von Null – gemeint? Oder ist ein bestimmtes Lösungsverfahren gemeint? Soll ein bestimmtes

Lösungsverfahren nur genannt oder angewendet werden? Und wenn Begriffe – wie oben - allein für sich stehen, gibt es auch keinen Kontext, aus dem man die Antworten auf diese Fragen ableiten könnte.

In CoKoMo2 wurde lange um die richtige Struktur der Ontologie – oder das „Meta-Wissensmodell“ – gerungen. Unsere zentrale Erkenntnis ist diese: die Ausformulierung des Meta-Modells zur Ontologie für Bildung kann nur aus den Use-Cases der Stakeholder kommen. Es macht also keinen Sinn, die Informatik zu möglichen Ausformulierungen von Ontologien zu befragen und dann eine zu wählen (vgl. Abschnitt „Prototypische Anwendungen“).

Das Problem: die Stakeholder, vor allem die zukünftigen, kennen wir nicht.

## Curricula, Lernobjekte, Suchmaschinen, Lernende – alle beziehen sich auf „Wissen“

Um die Stakeholder im Bildungssystem besser zu verstehen, wurden kleinteilig alle Menschen und Funktionen aufgenommen, die uns für die Bildungsproduktion wichtig erscheinen. Angefangen wurde mit Lehrkräften und Schülern, Eltern, Entwicklern von Lernobjekten und Curricula-„Designern“. Und es wurden klassische Lern-Management-Systeme heruntergebrochen in Anbieter für einen Katalog mit Lernobjekten, Lerntests, Learning-Analytics, Qualitäts-Management usw. Hinzu kommen Funktionen, die im klassischen Bildungsumfeld nicht explizit ausgewiesen werden – wie z.B. den Lehrkonzept-Entwickler – oder solche die es noch gar nicht gibt – wie automatische Entscheidungssysteme für die Wahl von pädagogischen Interventionen (vgl. [6], [9], [24], [29], [43], [53], [62]).

Beispiele von Algorithmen, die von „unseren“ Stakeholdern auf entwickelt und vermarktet werden sollen, sind:



ein Analyse-Modul, das aus Eingaben von Lernenden – z.B. Test-Ergebnissen oder Aussagen – einen Status dieser Person modelliert,



ein Entscheidungs-Modul für pädagogische Interventionen, das individuelle und situativ-motivierte Entscheidungen über die nächste Lehrintervention trifft,



ein „Erfahrungs“-Modul von formalisierten Interventionsoptionen, die aus didaktischer Sicht als sinnvoll erachtet werden; hier könnte auch KI ihren ersten Einsatz haben und



ein Katalog-Modul mit Lernobjekten (Texte, Videos, Tests, Projekt-Aufgaben, ...).

Im Projektverlauf von CoKoMo2 wurde die Vorstellung untersucht und untermauert, dass sich alle diese und weitere Stakeholder auf fachliches Wissen als elementaren Produktionsfaktor beziehen. Dabei wird der Begriff des Lernziels (vgl. [8]) als detaillierteste Ausformulierung eines Wissenselements verwendet. Drei Beispiele dazu:

- Ein Curriculum definiert einen Ausschnitt des Weltwissens als Aggregation von Lernzielen für einen (zertifizierbaren) Abschluss.

- Eine Lehrintervention zielt auf das möglichst effiziente Erreichen eines Lernziels ab.
- Ein Lernobjekt vermittelt Wissens Elemente zu einem bestimmten Lernziel.

Je eindeutiger fachliches Wissen und seine Elemente adressiert werden können, desto besser können Stakeholder – Menschen wie Computer – sich in einem gemeinsam vereinbarten Wissensraum orientieren und in der Bildungsproduktion davon profitieren.

### Anforderungen an ein Modell für Wissen – gestern, heute und morgen

Die erste und wichtigste Aufgabe in CoKoMo war es, ein bestimmtes Meta-Modell für die Erfassung von Wissen festzulegen, um es in der Web-Applikation zu implementieren und in der Modellierung von beispielhaftem Wissen zu erproben. Dieses Meta-Modell legt fest, aus welchen Kategorien von Elementen das Wissen eines CoKoMo Modells aufgebaut wird und welche Regeln für die Erstellung gelten. Dabei konzentriert sich das Projekt CoKoMo2 aus pragmatischen Gründen ganz auf konzeptionalisiertes / abstraktes Wissen.

Die Anforderungen der vielen Stakeholder, die aus der vorausgegangenen Value Network-Analyse abgeleitet wurden, sind teilweise sehr unterschiedlich. Im Projektverlauf wurde deshalb ein Vertreter ausgewählt, der in besonderer Weise die Anforderungen auch zukünftiger Dienste repräsentiert: Das „Intelligent Tutoring System“ (ITS). Es steht für einen Algorithmus-basierten Agenten, der individuell eine Schülerin oder einen Studenten beim Lernen unterstützt. Ein ITS ist damit der „digital Twin“ einer menschlichen Lehrkraft. Mit dem ITS als Referenz kann man in besonderer Weise deutlich machen, wie Menschen und Maschinen das Modell in vergleichbarer Weise nutzen können.

Die immanente Herausforderung des Agenten ist es, eine zweckmäßige, fachliche Lehrintervention auf der Grundlage von Wahrnehmungen zu einem lernenden Menschen zu formulieren.

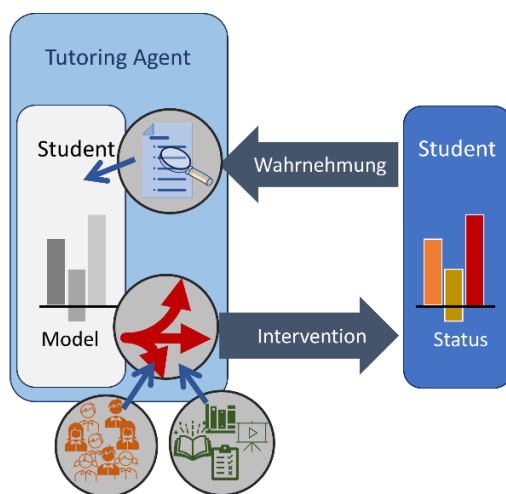


Bild 2: Funktionen eines Tutoring Agents.

Dafür sind „Analyse“- und „Entscheidungs“-Funktionen erforderlich (vgl. [41]). Entscheidungen im Sinne der zweckmäßigen Verfolgung eines Ziels (Lehrintention) benötigen Handlungsoptionen, also „Erfahrungen“. Und schließlich muss daraus eine konkrete Lernintervention erfolgen, die der Agent z.B. aus einem Fundus von Lernobjekten abrufft.

Wir fragen also nach möglichen Formalisierungen von pädagogischen Handlungen. Diese findet man bei Kognitionswissenschaftlern und Didaktikern aus den USA der 1980er Jahre (vgl. [12], [14], [42], [46], [47], [49], [56]). Es fällt auf, dass die Protagonisten dieser Modelle oft Physiker oder Ingenieure waren, die diesen Formalisierungen eine

gemeinsame Prägung geben.

Den Anfang macht jedoch der Psychologe Benjamin Bloom mit seiner Lernzieltaxonomie, die in vielen Zusammenhängen adaptiert wurde – bis hin zum Qualifikationsrahmen für deutsche Hochschulabschlüsse. Die weiteren Strukturelemente zur Wissensdarstellung haben wir Arbeiten insbesondere der Wissenschaftler Frederick Reif, Andrea diSessa und Alexander Romiszowski entliehen.

Auf Basis ihrer Arbeiten entstand unser grobes Konzept für die Funktionen eines Tutoring Agents, allerdings nur als Mittel zum Zweck. Denn der eigentliche Zweck ist das Design des darunter liegenden, zweckmäßigen Wissensmodells. Dabei ist wichtig festzuhalten, dass die Funktionen des Agenten sich immer auf dasselbe Wissensmodell beziehen müssen, um wie skizziert zu funktionieren. Mit dem gemeinsamen Wissensmodell geht ein weiterer wichtiger Aspekt zum Datenschutz einher: Der Agent kann in diesem Setting autark im Datenraum z.B. einer Schülerin agieren. Die Funktionen des Agenten kommen ohne einen Austausch von persönlichen Daten mit externen Systemen aus. Wir gehen davon aus, dass die Datensparsamkeit, die unser Wissensmodell ermöglicht, ein entscheidender Wettbewerbsvorteil im deutschen Bildungssystem sein wird.

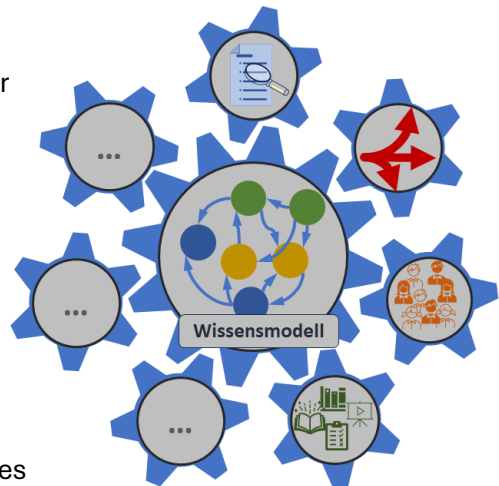


Bild 3: Das normative Wissensmodell als Integrationsknoten für EduTech-Anwendungen

## Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nach dem Änderungsbescheid des BMBF vom 14.03.2024 stehen für CoKoMo2 die folgenden Ausgaben-Positionen zur Verfügung:

Ausgaben		
0812	Beschäftigte E 12-E 15	228.929,76 €
0822	Beschäftigungsentgelte	18.720,00 €
0831	Gegenstände bis 800/410/400 €	4.660,00 €
0835	Vergabe von Aufträgen	265.988,00 €
0843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	3.974,00 €
0846	Dienstreisen	12.750,00 €
0850	Gegenstände & Investitionen > 800/410/400€	6.921,00 €
0865	Projektpauschale	108.388,55 €

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises der verausgabten Mittel - ohne Berücksichtigung der Projektpauschale – ergeben sich dann für

- die Beschäftigungsentgelte (E13) zu ca. 2/5 der relevanten Ausgaben sowie
- die Vergabe von Aufträgen zu ca. 3/5 aller relevanten Ausgaben.

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Das Fehlen einer gemeinsamen, standardisierenden maschinenlesbaren Ontologie für den deutschen digitalen Bildungsraum ist der Flaschenhals für die Entwicklung von interoperativen, offenen und innovativen Dienstleistungen für Schule und Hochschule.

CoKoMo2 hat diesen Flaschenhals in Value-Network Studien systematisch untersucht und dokumentiert. In diesen Studien hat das Forschungsvorhaben CoKoMo2 gezeigt, dass ein Lernen mit digitalen Services in einer durchlässigen und medienbruchlosen Lernlandschaft mit verschiedenen Bildungsangeboten und Bildungsformen nur mit einer standardisierenden Ontologie möglich ist.

Auf Grundlage dieser Studien hat CoKoMo2 einen Prototyp für eine Web-basierte, effektive und funktionale Ontologie entwickelt und vorgelegt.

Die eingesetzten finanziellen Mittel wurden dabei zu jedem Zeitpunkt zielführend und im Einklang mit den Anforderungen der Nationalen Bildungsplattform / meinBildungsraum sowie der Projektbeschreibung von CoKoMo2 verwendet.

Die eingesetzte Methodik der Value-Networks zur Beschreibung der zu erreichenden Mehrwerte hat zu jedem Zeitpunkt eine hohe Ziel-Mittel-Relation gesichert. Der eingesetzte Aufwand (Zeit, Budget, Personal) stand deshalb in einem sinnvollen Verhältnis zum Ergebnis: einem voll funktionsfähigen Prototypen für die zukünftige Entwicklung von E-Learning-Werkzeugen.

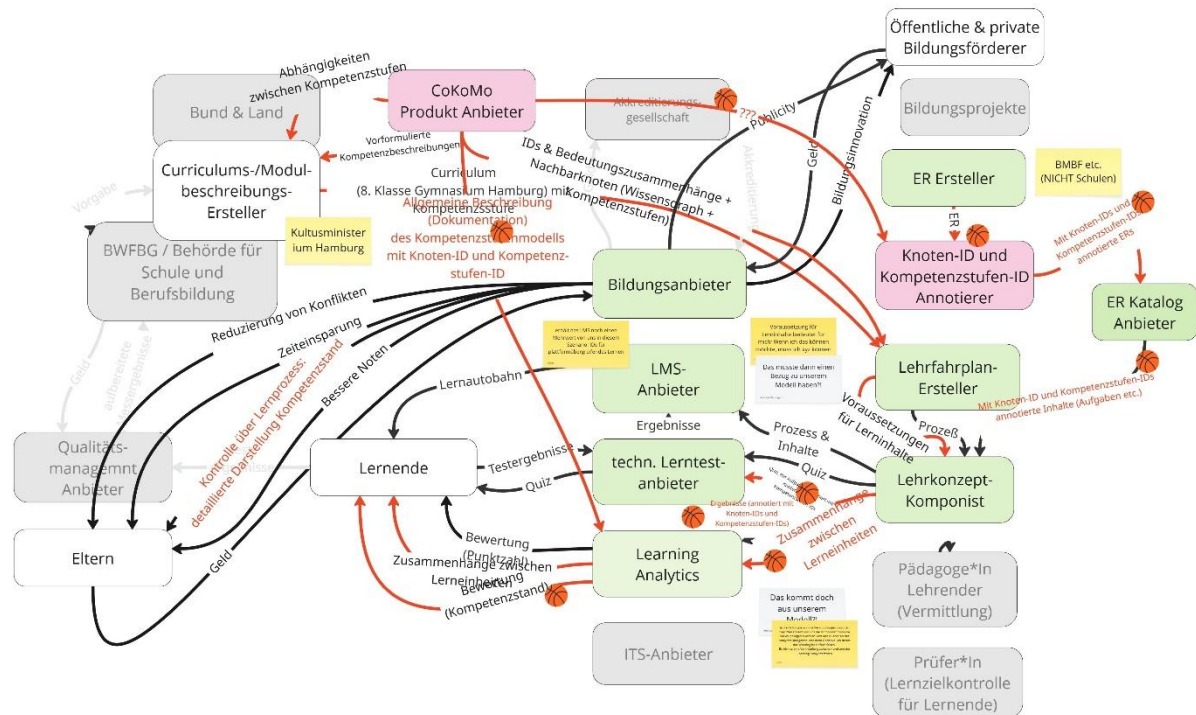
## Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Grundlage für die Entwicklung von CoKoMo sind Value-Networks, in denen der Mehrwert einer normativen Schnittstelle für die Bildungsproduktion aufgezeigt wurde.

Knoten des Value Networks zeigen für verschiedene Szenarien die Einzelinteressenten – den Organisationen sowie den Nutzenden – die durch die CoKoMo Schnittstelle ermöglichten Mehrwerte. Die Mehrwerte beziehen sich meist auf den Austausch von Daten und Informationen zu Bildungsinhalten und ihren Zusammenhängen.

So ermöglicht CoKoMo, dass

- Lernziele eindeutig und einheitlich indexiert – also ansprechbar – gemacht werden,
- Curricula durch ein Set von IDs von Lernzielen definiert werden,
- Bildungsanbieter Ihre Lehrinhalte aufgrund dieser IDs gestalten und abstimmen,
- Kataloge zu genau diesen und assoziierten Lernzielen Inhalte anbieten.



Ein Value-Network mit Funktionen (ggf. Organisationen) im E-Learning.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zeigen also strukturiert und transparent die Mehrwerte auf, die eine E-Learning-Landschaft in Deutschland durch eine einheitliche Wissensschnittstelle wie CoKoMo erzielen kann. Diese Mehrwerte können Grundlage für die Ausbildung eines Netzwerks von Unternehmen und Organisationen sein, die einen effizienten Beitrag zum E-Learning leisten. Dazu gehören einerseits bereits etablierte Organisationen wie Kataloge für open-source oder proprietäre Inhalte, aber auch innovative neue Unternehmen, die sich z.B. auf KI-basierte Tutoring-Systeme spezialisieren – ohne dafür selbst eine Lernplattform betreiben zu müssen.

Der Verwertungsplan von CoKoMo baut also stark auf die ursprüngliche Ausrichtung der Nationalen Bildungsplattform als inter- und kooperative Plattform. Und für diese Ausrichtung ist ein offenes, standardisierendes Wissensmodell wie CoKoMo unerlässlich.

Im Moment ist allerdings nicht erkennbar, dass dieses Ziel systematisch und ergebnisorientiert weiterverfolgt wird. Im Gegenteil: die momentanen E-Learning-Angeboten durch private Unternehmen oder Organisationen des dritten Sektors stehen mit ihren ähnlichen Produkten und einem – im Vergleich zu staatlichen Ausgaben – marginalen Markt in massiver Konkurrenz zueinander. Ihr Interesse ist es, möglichst viele Nutzende auf Ihre Plattform zu bekommen, also begrenzt innovative Lehr-Funktionalität als Closed-Shop zu etablieren.

Das kann sich ändern, wenn es für Unternehmen und Organisationen Anreize für kooperatives Verhalten gibt, also Lernmanagementsystem z.B. mit Katalogen oder Intelligent-Tutoring-Systemen zusammenarbeiten, um ihr Angebot für Kunden attraktiver zu machen.

Zu den Organisationen, deren kooperative Ausrichtung wichtig ist, zählen dabei auch staatliche Stellen wie Bildungsministerien: wenn sie z.B. ihre Lehrpläne als CoKoMo-kompatible Liste von Lernziel-IDs veröffentlichen, können Unternehmen diese direkt für Ihre Curricula-Spezifikation nutzen.

Das Ergebnis der Entwicklung von CoKoMo ist also ein Meta-Modell für konzeptualisiertes Wissen, das von einer Vielzahl von Organisationen als gemeinsame Schnittstelle genutzt werden kann. Das Forschungsvorhaben CoKoMo2 stellt dazu die frei zugängliche Web-Anwendung „CoKoMo“ unter

- <https://cokomo.code4you.com>

zur Verfügung. Auf den Seiten

- <https://CoKoMo-IT.de>

sind die Schnittstellen zu unserem Datenmodell für Menschen (das GUI) und für Maschinen (das API) dokumentiert. Mit der Anmeldung in der CoKoMo Web-App wird unter anderem auch ein Demo-Modell für Mathematik-Wissen aus dem Curriculum der Sekundarstufe II bereitgestellt.

CoKoMo unterscheidet dabei zwei Ausprägungen von Wissen:

- einer Strukturierung von Wissen nach Begriffen mit ihren Bedeutungszusammenhängen und
- einer Erfassung der Lerntiefe, die wir Kompetenz nennen.

## Begriffe und Bedeutungszusammenhänge

Als Beispiel für ein Wissensmodell sei hier auf das Lösungsschema „Statik starrer Körper“ aus der Technischen Mechanik für das erste Semester im Studiengang Maschinenbau verweisen:

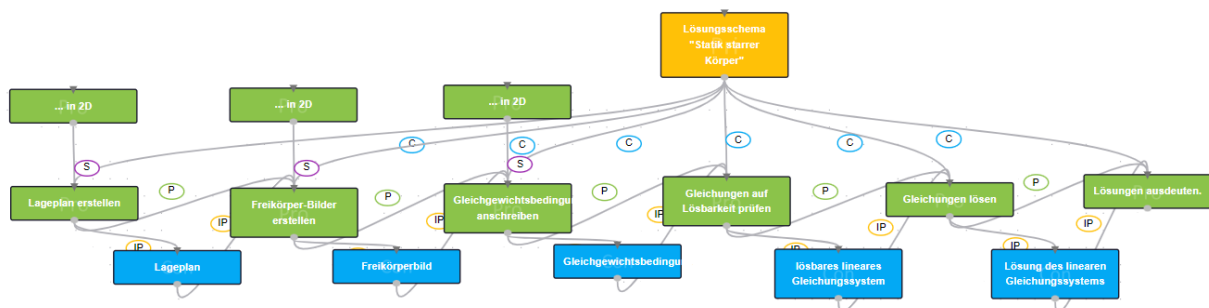


Bild 4: Das Wissensmodell für einen Ausschnitt des Moduls „Technische Mechanik 1“.

Im Bild erkennt man Karten in unterschiedlichen Farben. Diese stehen für Begriffe in unterschiedlichen Kategorien. So steht z.B. die blaue Karte „Freikörperbild“ für die Konzeptualisierung eines Freikörperbildes. Eine grüne Karte, z.B. „Gleichgewichtsbedingungen anschreiben“ steht für einen Prozess, beim dem aus einem Freikörperbild die (Gleichungen der) „Gleichgewichtsbedingung“ des Systems gewonnen werden. Und die gelbe Karte steht für das

Prinzip des „Lösungsschemas ‚Statik starrer Körper‘“. Die drei Kategorien für Wissens-elemente unseres Modells sind also „Concept“ (Konzeptualisierung), „Prozess“ und „Prinzip“.

Die Instanzen dieser drei Typen von Wissens-elementen sind über Bedeutungszusammenhänge miteinander verknüpft. So ist das „Freikörperbild“ das Ergebnis („Product of“) des Prozesses „Freikörperbild erstellen“. Auch für diese Bedeutungszusammenhänge haben wir zulässige Kategorien festgelegt.

In den Details zu einem Begriff werden jeweils der Typ des Elements und seine Verbindungen zu seinen Nachbarelementen angezeigt. Unter dem Menüpunkt „Kompetenzbasis“ finden sich dann eine Beschreibung des Wissens-elementes und weitere Informationen – wie zum Beispiel eine Sammlung alternativer Begriffe zu einem Element. Für den Prozess „Freikörperbild erstellen“ steht so als alternativer Begriff „Freischneiden“. Sucht man nun in seinem Modell nach dem Wissens-element „Freischneiden“, so landet man bei dem Element mit dem offiziellen Namen „Freikörperbild erstellen“.

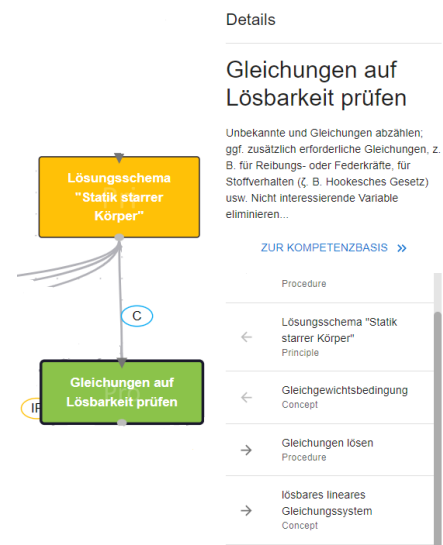


Bild 5: Details zum Element „Gleichungen auf Lösbarkeit prüfen“.

## Kompetenz: die Tiefendimension

Jedes der Wissens-elemente ist in CoKoMo nach der Bloomschen Taxonomie mit seinen Lernzielsätzen untersetzt. Das bedeutet: zu jedem Element gibt es auf jeder der sechs Kompetenzstufe eine Reihe von Lernzielsätzen. Beispiel: „Ich kann erläutern, warum die Gleichungen zum statischen Gleichgewicht eines Systems auf Lösbarkeit überprüft werden sollen.“. Nach Bloom gehört diese Aussage in die zweite Kategorie „Verstehen“ der Bloomschen Lernzieltaxonomie.

## Ist CoKoMo das richtige Wissensmodell?

Mit der qualitativen Unterteilung eines Wissensgebiets in Begriffe (Elemente) mit Ihren jeweiligen Bedeutungszusammenhängen projizieren wir dessen Semantik in ein Graphenmodell. Die Kompetenz-Dimension ermöglicht es weiter, zu jedem Element die Kompetenz strukturiert zu erfassen.

Mit dem CoKoMo-Prototypen sind dabei eine Reihe von Wissensmodellen erarbeitet worden, die wir über unser API zur Verfügung stellen.



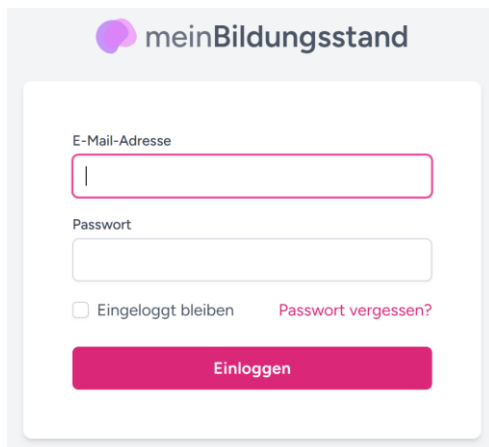
einheitliches Verständnis zwischen beteiligten Menschen und Organisationen eines Marktes herzustellen. So können Produktionsfaktoren reibungsfrei und effizient zwischen Marktteilnehmern ausgetauscht werden.

## Prototypische Anwendungen

In Gesprächen zur Verwertung von CoKoMo als standardisierte Schnittstelle wurde immer wieder festgestellt, wie schwer es ist, ihren konkreten Nutzen in der Bildungsproduktion deutlich herauszustellen. CoKoMo2 stellt deshalb 2 ½ Prototypen vor, die den Einsatz der Schnittstelle zeigen. Die Prototypen sind stand-alone Web-Applikationen, die auf CoKoMo als Wissensmodell zugreifen.

Die Prototypen:

- [mein-Bildungsstand.cokomo-it.de](http://mein-Bildungsstand.cokomo-it.de)




Dieser Prototyp sammelt individuell für eine Person die Rückmeldungen von Lernprozessen - also z.B. Ergebnisse von Tests.

Ein Beispiel:

Eine Person arbeitet in einem Lernmanagement-System (LMS) am Thema „Lösen von quadratischen Gleichungen mit der pq-Formel“. Das LMS meldet jeden Lernschritt – also erfolgreiche und fehlerhafte – Lernschritte an „mein-Bildungsstand“.

Aus dieser Lernhistorie können dann Kompetenzprofile abgeleitet werden, so z.B. für Tutoren, Lehrende usw., die darauf aufbauend passende Lehrinterventionen ausarbeiten können.

- [mein-Curriculum.cokomo-it.de](http://mein-Curriculum.cokomo-it.de)



Dieser Prototyp stellt Curricula als Set von Lernziel-IDs im Netz zur Verfügung. Jeder Lehrplan, jedes Curriculum kann hier als Sammlung von IDs bereitgestellt werden – z.B. von Bildungseinrichtungen oder öffentlichen Institutionen. Diese IDs können dann von anderen Web-Applikationen genutzt werden, um daraus Lernpfade – auch individuell - zu generieren.

- [mein-Tutor.cokomo-it.de](http://mein-Tutor.cokomo-it.de)

Dieser Prototyp ist zur Zeit im Entstehen. Die Applikation soll eine zentrale innovative Funktion im E-Learning zeigen, die durch CoKoMo möglich wird: ein automatisches Tutoring System.

Ausgehen von „mein-Bildungsstand“ und „mein-Curriculum“ kann das Tutoring-System aus dem CoKoMo-Graphen Lernpfade ableiten. Wir wollen zeigen, wie diese Funktion „im Prinzip“ durch CoKoMo – insbesondere die Bedeutungszusammenhänge zwischen den Wissens-elementen – möglich ist. Diese Applikation entsteht außerhalb der Finanzierung durch das BMBF und dient vor allem der Fortschreibung des Verwertungsplans.

## Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Um die Bildungsrendite zu steigern, gehen Nationalstaaten den Weg, den ihre jeweiligen Bildungssysteme aufzeigen. Besonders aktiv in der Entwicklung neuer Ansätze sind dabei im Moment China, Indien und Australien. Das Engagement dieser Staaten im E-Learning wird auch

deutlich anhand ihrer Beteiligung an der Entwicklung von internationalen Standards zum Lernen.

Interessant erscheint es, dass liberale Bildungssysteme, wie z.B. in den USA, keine systematischen Ansätze für die Implementierung von Bildungsplattformen hervorgebracht hat. Hier dominiert der Einsatz von proprietären Produkten wie z.B. ALEKS von McGraw-Hill.

Die Modelle, auf denen z.B. ALEKS oder die chinesischen Plattformen basieren, sind nicht im Detail veröffentlicht worden – ein Abgleich mit CoKoMo ist deshalb nicht möglich.

## Zur internationalen Standardisierung von Informationstechnologie zum Lernen

Mehrere internationale Normen werden zur Zeit entwickelt, um Rahmen, Modelle und eine Systemarchitektur für Kompetenz- und Leistungsinformationen bereitzustellen und eine Möglichkeit zur Aggregation von Kompetenzinformationen zu schaffen. Diese Normen bieten einen allgemeinen Rahmen und ein Informationsmodell für die Verwaltung und den Austausch von Informationen über Wissen, Fertigkeiten, Fähigkeiten, Einstellungen und Bildungsziele. Der Schwerpunkt dieser internationalen Normen liegt insbesondere auf der Erweiterung der in ISO/IEC TR 24763 enthaltenen Konzepte durch detailliertere Informationen zu Kompetenzinformationen und deren Aggregation.

Diese Normen werden seit dem Jahr 2021 maßgeblich von Korea, Australien, Indien und China vorangetrieben und in verschiedenen Applikationen implementiert. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist Deutschland an der aktiven Arbeit der Gremien nicht beteiligt. Prof. Baumgart folgt der Entwicklung dieser Dokumente sporadisch.

Die Normen können von Softwareentwicklern und -implementierern, Instruktionsdesignern und Testdesignern sowie anderen genutzt werden, um sicherzustellen, dass Lern-, Bildungs- und Trainingsumgebungen den Kompetenzanforderungen von Lernenden und Organisationen gerecht werden. Darüber hinaus enthält diese internationale Norm Definitionen verschiedener Arten von Kompetenzinformationen.

Einen guten Überblick über die Arbeiten der ISO-Workinggroup und den Stand der Entwicklung vermittelt Dokument

- Systematic Review of ISO/IEC 20006-1:2014 "Information technology for learning, education and training — Information model for competency — Part 1: Competency general framework and information model".

Die Entwicklung dieser Standards und Normen hat das gleiche Ziel wie CoKoMo: die Interoperabilität von Informationstechnologie zum Lernen zu ermöglichen.

Für einen inhaltlichen Abgleich oder eine Mitarbeit in den internationalen Gremien standen für das Projekt CoKoMo keine Ressourcen zur Verfügung.

## Zur Implementierung von innovativen Informationsmodellen im E-Learning

Informationsmodelle zur Bildung gibt es seit vielen Jahren und die TIB in Hannover hat eine große Sammlung dazu (vgl. <https://terminology.tib.eu/ts/ontologies>). Die folgende Auswertung beschränkt sich hier deshalb auf Dienstleister, die von sich selbst angeben, einen Tutor bereitzustellen.

Hier eine Übersicht:

Name	Anbieter	Schwerpunkte	Besonderheiten
<b>ALEKS</b>	McGraw Hill	Mathematik, Chemie, Statistik	Knowledge Space Theory, adaptiv
<b>SeisTutor</b>	Seis Deutschland	MINT-Fächer, Berufsbildung	KI-generierte Aufgaben und Feedback
<b>Carnegie Learning</b>	Carnegie Learning Inc.	Mathematik (v.a. Sek I & II)	KI-basiertes „Cognitive Tutor“-Modell
<b>Socratic</b>	Google	Allgemeine Schulfächer (per App)	Antwortvorschläge + Erklärvideos via KI
<b>Knewton Alta</b>	Wiley	Mathematik, Wirtschaft, Naturwissenschaften	Adaptive Lernpfade mit Echtzeitdaten
<b>Squirrel AI</b>	China	Breites Fächerspektrum	Rein KI-gesteuertes Tutoring

Im Folgenden sei anhand von ALEKS (McGraw-Hill, USA) und SeisTutor (China) eine kurze Darstellung der Innovationen der letzten Jahre zusammengefasst. Diese Analyse beziehen sich auf deren Selbstdarstellung im Internet [1] und Veröffentlichungen:

### 1. Feinere Diagnose von Lernständen

ALEKS nutzt die „Knowledge Space Theory“ zur präzisen Diagnose individueller Wissenslücken. Inzwischen wurden die Algorithmen verbessert, um Lernpfade noch dynamischer an den tatsächlichen Wissensstand der Lernenden anzupassen. Sowohl ALEKS als auch SeisTutor geben an, durch innovative KI-Modelle besser zwischen Konzeptmissverständnissen und Flüchtighkeitsfehlern unterscheiden zu können.

## 2. **Personalisierung durch KI**

Beide Systeme setzen zunehmend auf „adaptive Lernpfade“, wobei die Inhalte und Aufgaben in Echtzeit an das Leistungsprofil angepasst werden.

Sie geben an, durch innovative KI-Modelle (z. B. Transformer-basierte Systeme) eine semantische Rückmeldung und intelligenteren Aufgabengenerierung zu ermöglichen.

## 3. **Automatische Aufgaben- und Inhaltsgenerierung**

SeisTutor gibt an, mit Hilfe einer generativen KI automatisch Aufgaben, Erklärungen und sogar Mini-Tests erzeugen zu können. Diese werden an das Unterrichtsprofil, den Anspruch und den Kontext angepasst.

ALEKS gibt an, erweitert Inhalte zunehmend automatisch und basierend auf Curricula und Lernanalysen erstellen zu können.

## 4. **Multimodale Lernunterstützung**

Beide Systemen gaben an, Fortschritte bei Text-to-Speech, visuellem Feedback und kontextsensitiven Hilfestellungen zu machen, um die Barrierefreiheit und Nutzerfreundlichkeit zu verbessern.

Systeme wie SeisTutor setzen auf sogenannte multimodale Feedbackschleifen, d. h. die Kombination aus Text, Video und interaktiven Elementen.

## 5. **Analyse und Prognose von Lernerfolgen**

Beide Systeme bieten Lehrkräften mittlerweile „Dashboards mit Predictive Analytics“, um Leistungen von Schülerinnen und Schülern sowohl als Kohorte als auch individuell zu monitoren. Damit können Lehrkräfte Themen identifizieren, die wiederholt werden müssen und sie können sich so besser auf Unterrichtseinheiten vorbereiten. Risiken für den zukünftigen Lernprozess können damit frühzeitig erkannt werden.

Fortschrittliche Modelle sollen dabei mit hoher Genauigkeit prognostizieren, ob und

wann ein Schüler oder eine Schülerin Unterstützung benötigen wird.

## 6. Integration in hybride Lernumgebungen

Durch spezielle Schnittstellen (Learning Tools Interoperability) sind ALEKS und SeisTutor leichter in bestehende LMS wie Moodle oder Microsoft Teams integrierbar.

Hier werden kompetenzbasierte Curricula (z. B. nach Bloom oder KMK-Kompetenzrastern) unterstützt.

Hier bestehen vermutlich enge inhaltliche Bezüge zu unserer Arbeit mit CoKoMo.

Allerdings konnten wir zu diesen Angaben von SeisTutor und ALEKS keine technischen Details finden.

## Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF BMBF-Vordr. 0701/12.22

Die Beschreibung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse des CoKoMo-Projekts erfolgt ausschließlich über die CoKoMo Webseite

- <https://cokomo-it.de>.

Hier werden sowohl die Funktionalität des voll funktionsfähigen Prototypen beschreiben als auch die Theorieinhalte der Forschungsarbeiten dokumentiert.

Nach dem Ende der Projektlaufzeit von CoKoMo2 ist der Projektleiter Prof. Baumgart weiterhin im Kontakt mit Interessenvertretern der Edu-Tech-Bewegung und versucht, Unternehmen für den Einsatz von CoKoMo in ihrem Umfeld zu gewinnen.

Zur Zeit gibt es allerdings keine relevanten Forschungsvorhaben, die bereit sind, CoKoMo als Schnittstelle einzusetzen.

## Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Nach dem aktualisierten und genehmigten Änderungsbescheid zu CoKoMo2 vom 14.03.2024 wurden die geplanten Ziele zur Ausgaben und Zeitplanung eingehalten.

## Literaturverzeichnis

- [1] „ALEKS – Adaptive Learning & Assessment for Math, Chemistry, Statistics & More“.

*ALEKS: The Research-Based, Online Learning Program*, <https://www.aleks.com/>.

Zugegriffen 23. Dezember 2023.

- [2] „Allgemeines Metadatenprofil Für Bildungsressourcen“. *Ein Schema.Org-/LRMI-*

*Basiertes Metadatenprofil Für Die Beschreibung von Lehr- Und Lernressourcen Mit Fokus*

- Auf Den Deutschsprachigen Raum.*, <https://dini-ag-kim.github.io/amb/>. Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [3] Anderson, Lorin W., und David R. Krathwohl, Herausgeber. *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Complete ed, Longman, 2001.
- [4] Baker, Daniel W., und William Haynes. *Engineering Statics - Open and Interactive*. Baker and Haynes, 2023, <https://open.umn.edu/opentextbooks/formats/2574>.
- [5] Baumgart, Andreas. „Feedback in the Learning Loop - how Moodle data help us direct learning –“. *Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), E-Learn: World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education.*, 2016, S. 1296–306.
- [6] Baumgart, Andreas, und Amir Madany Mamlouk. „A Knowledge-Model for AI-Driven Tutoring Systems“. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, herausgegeben von Marina Tropmann-Frick u. a., IOS Press, 2022, <https://doi.org/10.3233/FAIA210474>.
- [7] *Bildungsplan Gymnasium der Stadt Hamburg, Sekundarstufe I, Mathematik*. <http://www.hamburg.de/bildungsplaene/nofl/2373292/mathematik-gym-seki/>. Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [8] Bloom, Benjamin S., Herausgeber. *Taxonomy of Educational Objectives - The Classification of Educational Goals*. Longmans, Green & Co., 1956.
- [9] Bourdeau, Jacqueline, und Monique Grandbastien. „Modeling Tutoring Knowledge“. *Advances in Intelligent Tutoring Systems*, herausgegeben von Nkambou R u. a., Springer, 2010, S. 123–43, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14363-2>. *Studies in Computational Intelligence*, volume 308.
- [10] „CoKoMo - Conceptual Knowledge Models“. *Knowledge-Models for Education*, 2023, <https://cokomo-it.de/docs/>.
- [11] Dammer, Karl-Heinz. *Die „Digitale Welt“ im Diskurs Gutachten zur Digitalstrategie der KMK und des Landes NRW aus bildungspolitischer Sicht*. Pädagogische Hochschule Heidelberg, 2022, <https://phv-nrw.de/wp-content/uploads/2022/09/PhV-NRW-Gutachten-Digitale-Welt-im-Diskurs-150dpi.pdf>.
- [12] diSessa, Andrea A., u. a. „Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force“. *Cognitive Science*, Bd. 28, 2004, S. 843–900, <https://doi.org/doi:10.1016/j.cogsci.2004.05.003>.

- [13] „Social Niches for Future Software“. *Toward a Scientific Practice of Science Education*, herausgegeben von Margorine Gardner, 0 Aufl., Lawrence Erlbaum Associates, 1990, <https://doi.org/10.4324/9780203062746>.
- [14] diSessa, Andrea A., und David Hammer. „A Friendly Introduction to ‚Knowledge in Pieces‘: Modeling Types of Knowledge and Their Roles in Learning“. *Science Education in Theory and Practice*, 2020. Springer Texts in Education.
- [15] „Erstes Pilotprojekt für Nationale Bildungsplattform startet - BMBF“. *Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF*, [https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/\\_documents/erstes-pilotprojekt-fuer-nationale-bildungsplattform-startet.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/_documents/erstes-pilotprojekt-fuer-nationale-bildungsplattform-startet.html). Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [16] *Europäischer Rat Lissabon 23-24.03.2000: Schlußfolgerungen des Vorsitizes*. [https://www.europarl.europa.eu/summits/lis1\\_de.htm](https://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_de.htm). Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [17] *European Skills, Competences, Qualifications and Occupations*. 21. September 2023, <https://esco.ec.europa.eu/en>.
- [18] „Fasteners – Bolts, screws, studs and nuts – Symbols and descriptions of dimensions (ISO 225:2010)“. Version 2010, no. 225, Beuth, 2010.
- [19] Gardner, Marjorie, u. a. *Toward a Scientific Practice of Science Education*. Taylor & Francis, 2013.
- [20] Graßl, Hans. *Ökonomisierung der Bildungsproduktion: Zu einer Theorie des konservativen Bildungsstaats*. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2019, <https://doi.org/10.5771/9783845291239>.
- [21] Gruber, Thomas R., und Gregory R. Olsen. „An Ontology for Engineering Mathematics“. *KR'94: Proceedings of the Fourth International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 1994, <https://dl.acm.org/doi/proceedings/10.5555/3087304>.
- [22] Grüninger, Michael, und Mark S. Fox. „The Role of Competency Questions in Enterprise Engineering“. *Benchmarking — Theory and Practice*, herausgegeben von Asbjørn Rolstadås, Springer US, 1995, S. 22–31, [https://doi.org/10.1007/978-0-387-34847-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-34847-6_3). IFIP Advances in Information and Communication Technology.
- [23] Hattie, John, und Gregory Yates. *Visible learning and the science of how we learn*. Routledge, Taylor & Francis Group, 2014.

- [24] Hayashi, Yusuke, u. a. „Using Ontological Engineering to Organize Learning/Instructional Theories and Build a Theory-Aware Authoring System“. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Bd. 19, Nr. 2, 2009, S. 211–52, <https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-artificial-intelligence-in-education/jai19-2-05>.
- [25] Hitzler, Pascal, u. a., Herausgeber. *Semantic Web: Grundlagen*. 1. Aufl, Springer, 2008. eXamen.press.
- [26] Hoffmann, Joachim, und Johannes Engelkamp. *Lern- und Gedächtnispsychologie*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33866-3>. Springer-Lehrbuch.
- [27] *IEEE Standard for Learning Object Metadata*. IEEE, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9262118>. Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [28] Ifenthaler, Dirk, u. a. „Putting Learning Back into Learning Analytics: Actions for Policy Makers, Researchers, and Practitioners“. *Educational Technology Research and Development*, Bd. 69, Nr. 4, 2021, S. 2131–50, <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09909-8>.
- [29] Ifenthaler, Dirk, und Jane Yin-Kim Yau. „Utilising Learning Analytics to Support Study Success in Higher Education: A Systematic Review“. *Educational Technology Research and Development*, Bd. 68, Nr. 4, 2020, S. 1961–90, <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09788-z>.
- [30] Kautz, Christian H., u. a. *Tutorien zur Technischen Mechanik: Arbeitsmaterialien für das Lehren und Lernen in den Ingenieurwissenschaften*. Springer Vieweg, 2018. Lehrbuch.
- [31] Kortemeyer, Gerd, u. a. „Models for Content Management in a Next Generation Learning Management Ecosystem“. *Eleed*, Bd. 14, Nr. 2, Juli 2022, [https://www.eleed.de/archive/14/5530/index\\_html](https://www.eleed.de/archive/14/5530/index_html).
- [32] Kortemeyer, Gerd, und Stefan Dröschler. „A User-Transaction-Based Recommendation Strategy for an Educational Digital Library“. *International Journal on Digital Libraries*, Bd. 22, Nr. 2, 2021, S. 147–57, <https://doi.org/10.1007/s00799-021-00298-8>.
- [33] „Report from the Next Generation Learning Management System Workshop 2020“. *Eleed*, Bd. 14, Nr. 1, Juli 2021, [https://www.eleed.de/archive/se2021/5323/index\\_html](https://www.eleed.de/archive/se2021/5323/index_html).

- [34] Kultusministerkonferenz. „Bildungsstandards“. *Bundesweit geltende Bildungsstandards*, <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsstandards.html>. Zugegriffen 22. Dezember 2023.
- [35] Larkin, Jill H., und Herbert A. Simon. „Why a Diagram Is (Sometimes) Worth Ten Thousand Words“. *Cognitive Science*, Bd. 11, Nr. 1, 1987, S. 65–100.
- [36] *Lehrkräfteeinstellungsbedarf und -angebot*. <https://www.kmk.org/dokumentation-statistik/statistik/schulstatistik/lehrkraefteeinstellungsbedarf-und-angebot.html>. Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [37] Luhmann, Niklas, und Dieter Lenzen. „Erziehender Unterricht als Interaktionssystem“. *Schriften zur Pädagogik*, Suhrkamp, 2004. Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 1697.
- [38] Monyer, Hannah, und Martin Gessmann. *Das geniale Gedächtnis: Wie das Gehirn aus der Vergangenheit unsere Zukunft macht*. Penguin, 2017.
- [39] *MoodleNet: Search for Resources, Subjects, Collections or People*. <https://moodle.net/>. Zugegriffen 26. Dezember 2023.
- [40] Niemi, Hannele, u. a. *AI in Learning: Designing the Future*. Springer, 2023, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-09687-7>.
- [41] Padgham, Lin, und Michael Winikoff. *Developing intelligent agent systems: a practical guide*. John Wiley, 2004. Wiley series in agent technology.
- [42] Paquette, Gilbert. *Visual Knowledge Modeling for Semantic Web Technologies: Models and Ontologies*. IGI Global. IGI Global, 2010, <https://doi.org/10.4018/978-1-61520-839-5>.
- [43] Pavlik Jr., Philip I., u. a. „A Review of Student Models Used in Intelligent Tutoring Systems“. *Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems*, 1: Learner Modeling, 2013.
- [44] *Proceedings of the 2023 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Richland, 2023. ACM Digital Library.
- [45] „Programme for International Student Assessment“. *OECD*, <https://www.oecd.org/pisa/>. Zugegriffen 22. Dezember 2023.
- [46] Reif, Fred. „Teaching Higher-Order Thinking Skills for a Technological World: Needs and Opportunities.“ *American Educational Research Association, Viewpoints*, November 1984.
- [47] Reif, Frederick. *Applying Cognitive Science to Education: Thinking and Learning in Scientific and Other Complex Domains*. MIT Press, 2008. A Bradford Book.

- [48] „Interpretation of Scientific or Mathematical Concepts: Cognitive Issues and Instructional Implications“. *Cognitive Science*, Bd. 11, 1987, S. 395–416.
- [49] Romiszowski, Alexander Joseph. *Designing Instructional Systems: Decision Making in Course Planning and Curriculum Design*. Reprinted, Kogan Page [u.a.], 1995.
- [50] *Schema.org*. <https://schema.org/>. Zugegriffen 25. Dezember 2023.
- [51] Schmid, Ulrich, u. a. *MACHBARKEITSSTUDIE FÜR EINE (INTER-)NATIONALE PLATTFORM FÜR DIE HOCHSCHULLEHRE*. Ergebnisbericht no. 33, hochschulforum digitalisierung, 2018, <https://hochschulforumdigitalisierung.de/machbarkeitsstudie-fuer-eine-inter-nationale-plattform-fuer-die-hochschullehre/>.
- [52] Schröder, Hartwig. *Lernen - Lehren - Unterricht: lernpsychologische und didaktische Grundlagen*. 2., Durchges. Aufl, Oldenbourg, 2002. Hand- und Lehrbücher der Pädagogik.
- [53] Singh, Ninni, u. a. „Performance Metrics: Intelligent Tutoring System“. *Cognitive Tutor: Custom-Tailored Pedagogical Approach*, Springer Nature Singapore, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-981-19-5197-8>. Advanced Technologies and Societal Change.
- [54] *SKOS Simple Knowledge Organization System Reference*. <https://www.w3.org/TR/skos-reference/>. Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [55] Sliwka, Anne, u. a. „Digital, nachhaltig, gerecht: Eine strategische Kernroutine zur adaptiven Förderung in der Schule“. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, Bd. 52, Februar 2023, S. 169–90, <https://doi.org/10.21240/mpaed/52/2023.02.09.X>.
- [56] Streif, Paul. „Engineering-Education.com — Concept Assessment Tool for Statics“. *CATS*, <https://engineering-education.com/CATS-index.php>. Zugegriffen 25. Dezember 2023.
- [57] Szabo, Istvan. *Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihrer wichtigsten Anwendungen*. Birkhäuser, 1977. Wissenschaft und Kultur 32.
- [58] *The Linked Open Data Cloud*. <https://lod-cloud.net/>. Zugegriffen 18. Dezember 2023.
- [59] *TIB terminology service*. <https://terminology.tib.eu/ts/ontologies>. Zugegriffen 25. Dezember 2023.
- [60] Wang, Yan, u. a. „A Courses Ontology System for Computer Science Education“. *2019 IEEE International Conference on Computer Science and Educational Informatization (CSEI)* [Kunming, China], 2019, S. 251–54, <https://doi.org/10.1109/CSEI47661.2019.8938930>.

- [61] Wang, Yi, und Ying Wang. „A Survey of Ontologies and Their Applications in e-Learning Environments“. *Journal of Web Engineering*, Oktober 2021, <https://doi.org/10.13052/jwe1540-9589.2061>.
- [62] Weiss, G., u. a. „Intelligent agents. H. Bidgoli (Ed.)“. *The Handbook of Technology Management*, Bd. 3, John Wiley & Sons, Inc., 2010, S. 360–72.
- [63] Wildt, Johannes, und Rüdiger Rhein, Herausgeber. *Hochschuldidaktik als Wissenschaft - Disziplinäre, interdisziplinäre und transdisziplinäre Perspektiven*. transcript Verlag, 2023, <https://www.transcript-verlag.de/978-3-8376-6180-4/hochschuldidaktik-als-wissenschaft/>. pedagogy.
- [64] „WirLernenOnline - Freie - Bildung - zum - Mitmachen.“ *Wir lernen online*, <https://wirlernenonline.de/>. Zugegriffen 27. Dezember 2023.