

Semantic Web Paradigmen

SEMINARARBEIT

25. Oktober 2014

Simon Heimler

heimlersimon@gmail.com

Master of Applied Research in Computer Science

Informationssysteme

Prof. Dr. Sabine Müllenbach

University of Applied Sciences Augsburg

Abstract

Üblicherweise wird das Thema Semantic Web anhand des Semantic Web (Technologie) Stacks¹ erklärt. Dieser Artikel soll einen alternativen Weg gehen: Nicht die technische Umsetzung steht im Vordergrund, sondern die Konzepte und Paradigmen hinter ihnen.

Dazu wurde eine subjektive Auswahl von fünf Semantic Web Paradigmen getroffen: (1) Mensch-Computer Kooperation, (2) Hyperlinks (3) Graphenstruktur, (4) die Trennung von Fakt und Interpretation und (5) die Open World Assumption (Offene-Welt-Annahme).

Keines dieser Paradigmen ist ausschließlich im Kontext von Semantic Web zu finden. Im Gegenteil: Die Konzepte haben ihren Ursprung in anderen Disziplinen. Selbst wenn der Leser also nicht die ganze Semantic Web Vision „kauft“, können diese Paradigmen dennoch eine wertvolle Bereicherung sein, da sie interessante Lösungen zu aktuellen Problemen aufzeigen.

Wenn man die Paradigmen zusammenführt bilden sie (zusammen mit weiteren) die Grundlagen der Semantic Web Vision.

Keywords: Semantic Web, Linked Data, Hyperlinks, Hypertext, Mensch-Computer-Kooperation, Open World Assumption, Graphenstruktur

Abkürzungsverzeichnis

SW	Semantic Web
SWT	Semantic Web-Technologien
OWA	Open World Assumption
CWA	Closed World Assumption
SEO	Suchmaschinenoptimierung

¹ Tim Berners-Lee 2009

1 Einleitung

Ein bekanntes Zitat, das nachträglich diversen Autoren zugeschrieben wird, besagt: *„Wer als Werkzeug nur einen Hammer hat, sieht in jedem Problem einen Nagel.“*

Dies ist offensichtlich eine Aufforderung sich mit anderen, neuen Werkzeugen zu beschäftigen. „Werkzeug“ ist hier natürlich eine Metapher: Oberflächlich verstanden, könnte das einem zu Verfügung stehende Handlungsrepertoire gemeint sein. Doch hinter diesem stehen unsere (oft festgefahrene) Paradigmen, also Denkweisen und Weltanschauungen, die unser Handeln ursächlich bestimmen.

Die konkreten technischen Werkzeuge ändern sich. Doch die grundsätzlichen Ideen hinter ihnen sind beständiger und für das Verständnis wichtiger. Deshalb wird sich dieser Artikel mehr auf das „Warum?“ konzentrieren und weniger auf das „Wie?“.

Das Ziel ist es dem Leser einige Paradigmen aus der Semantic Web Community vorzustellen. Sie zeigen alternative Herangehensweisen zu aktuellen Problemen auf, die bisher relativ unbekannt sind.

2 Vorstellung der Paradigmen

2.1 Mensch-Computer-Kooperation

Es ist nicht mehr zu verleugnen, dass es einige Gebiete gibt, in denen Computer mittlerweile erheblich besser und effizienter arbeiten als Menschen. Es kann allerdings auch umgekehrt argumentiert werden: Trotz allen Fortschritten in der KI Forschung gibt es viele Bereiche, in denen Menschen nicht ersetzt werden können – oder sollten.

Das Konzept der Mensch-Computer-Kooperation bietet eine weitere Sichtweise: Menschen haben bestimmte Stärken und Schwächen - und Computer die ihre. Wenn beide Seiten miteinander auf produktive Weise zusammenarbeiten und dies berücksichtigt wird, kann das Ergebnis die Leistung beider Seiten im Alleingang weit übertreffen².

Das Semantic Web kann als Initiative für eine bessere Mensch-Computer-Kooperation für das Web verstanden werden. Wenigen wird dies bewusst sein, doch das aktuelle Web ist für Menschen optimiert und für Maschinen oft nur sehr schwierig und missverständlich zu interpretieren.

Um eine produktivere Kooperation zu ermöglichen müssen Webseiten also so verfasst und erstellt werden, dass sie sowohl von Menschen als auch Maschinen gut verstanden werden können. Metadaten allein lösen dieses Problem nicht, da sie nur die Dokumente und Dateien an sich beschreiben, nicht aber deren Inhalt.

² Sankar 2012

Semantic Web Technologien wollen dieses Problem durch semantische Annotation lösen. „Semantisch“ bedeutet in diesem Kontext, dass die tatsächliche *Bedeutung* und der Inhalt auf maschinenlesbare Weise erfasst werden. „Annotation“ deutet an, dass der bereits bestehende Inhalt durch maschinenlesbare Informationen zusätzlich „kommentiert“ wird.

Dies ermöglicht es Computern die Inhalte eindeutig zu verstehen und nicht nur durch KI Technologien zu „erraten“, was oft zu Fehlern führt und aufwendig ist. Dadurch können Suchmaschinen relevantere und intelligentere Ergebnisse berechnen. Wissen kann aus verschiedenen Quellen neu kombiniert und evaluiert werden. Dieses Konzept kann auch eine neue Generation von Webdiensten ermöglichen, die noch kooperativer zusammenarbeiten als es bisher möglich ist.

Dies ist natürlich ein sehr ambitioniertes Vorhaben und es bleibt noch abzuwarten in welchem Umfang und Qualität es sich erfüllen wird.

2.1.1 Aktueller Stand

Semantische Annotation ist der Teil des Semantic Webs, der bis jetzt die breiteste Akzeptanz gefunden hat. Viele große Webunternehmen haben die letzten Jahre begonnen semantische Annotationen zu fördern und zu verarbeiten. Damit wird die Annotation für Webentwickler (auch kommerziell) interessant bis wichtig, da sie bessere SEO und Integration mit diesen Anbietern verspricht. Die Nutzer profitieren von den neuen Angeboten und Services, die aufgrund dieser Technologie möglich oder besser geworden sind.

Schema.org³ ist ein Projekt von Google, Yahoo, Microsoft und Yandex, das ein gemeinsames Vokabular für die Beschreibung von Dingen und Vorgängen im Internet definiert. Facebook hat einen eigenen Standard entwickelt, den OpenGraph⁴.

Auch im Bereich Forschung und Industrie wurden Semantic Web Technologien aufgegriffen um übergreifende Standards zu schaffen, wie etwa das SKOS Modell⁵ zur Verwaltung von Wissensbeständen.

2.1.2 Technischer Hintergrund

Aktuell gibt es viele unterschiedliche Semantic Web Datenserialisationsformate, viele von ihnen vom W3C standardisiert. Größere Verbreitung haben RDFa⁶ und Microdata⁷, die beide auf XML basieren. Steigende Verbreitung hat aktuell JSON-LD⁸, das auf dem einfachen JSON Datenformat aufbaut. Als textbasiertes Format ist Turtle⁹ zu erwähnen.

³ Google Inc. et al.

⁴ Facebook 2014

⁵ Antoine Isaac und Ed Summers 2009

⁶ Manu Sporny 2013

⁷ Ian Hickson 2014

⁸ Manu Sporny et al 2014

⁹ Gavin Carothers und Eric Prud'hommeaux 2013

Alle diese Formate teilen sich ein zugrundeliegendes Daten-Konzept: RDF¹⁰. Auf dieses wird im Abschnitt 2.2 tiefer eingegangen.

2.2 Hyperlinks

Hyperlinks sind nicht erst mit dem Web erfunden worden. Sie haben eine lange Geschichte, die mindestens bis zur Memex zurückreicht¹¹ und waren wichtiger Bestandteil der in den 60er Jahren entstehenden Hypertext Systeme¹².

Wenn heute von Links gesprochen wird, ist meist nur das Ziel der Verknüpfung, die URI (Unique Resource Identifier) gemeint. URIs identifizieren eine Ressource durch eine eindeutige Adresse. Doch ein Link besteht aus mehr Komponenten: Eine Quelle und mindestens ein Ziel. Falls mehrere Ziele möglich sind, spricht man davon, dass ein Link eine beliebige Arität haben kann¹³. Meist kommt eine Relation, die die Beziehung zwischen Quelle und Ziel definiert, hinzu.

Der Erfinder des WWW, Tim-Berners Lee entschied sich dafür eine vereinfachte Version der Links zu verwenden: Links sind direktional, die Quelle ist implizit (die Seite auf der der Link angegeben wird), nur ein Ziel wird unterstützt und die Relation zwischen Quelle und Ziel spielt keine große Rolle.

Dadurch sind Links im Web einfacher, aber auch nicht so flexibel wie einige konkurrierende Hypertext Systeme. Die unidirektionale Natur der Verknüpfungen ermöglicht die dezentrale Struktur des Internets, da keine zentral verwaltete Datenbank aller Verknüpfungen nötig ist. Links können also ohne vorherigen Konsens gesetzt werden. Dies macht das Setzen von Links unkompliziert, der Preis dafür sind allerdings „tote“ Links. Rückblickend wird diese Entscheidung mit für den Erfolg des Webs verantwortlich gemacht¹⁴.

Weblinks sind also eine bewusst vereinfachte Implementierung. Das Semantic Web setzt an dieser Stelle ein und baut das Konzept der Links und URIs weiter aus.

Links können als Tripels verstanden werden: Quelle - Relation - Ziel. In der Graphentheorie wird auch oft von Node - Edge - Node gesprochen. Im Semantic Web wird daraus das Konzept von RDF, das diese in eine minimale grammatische Aussage umformuliert: Subjekt - Prädikat - Objekt. (Beispiel: „Franz Meier“ „hat Sohn“ „Rudolf Meier“.) Die Relation bekommt damit eine zentrale Rolle: Erst durch sie bekommt die Aussage auch eine semantische Bedeutung.

¹⁰ Eric Miller und Frank Manola 2004

¹¹ O'Regan 2012, S. 102

¹² Nelson 1965

¹³ Frank G. Halasz 1990, S. 9

¹⁴ Hendrik Arndt 2006, S. 153–154

Jedes Element dieses Triples ist ein URI. Diese können nicht nur verwendet werden um Adressen zu Webseiten anzugeben. Sie können auch auf abstrakte Dinge oder Beziehungen verweisen:

A Uniform Resource Identifier (URI) is a compact sequence of characters that identifies an abstract or physical resource.¹⁵

Der Begriff „Resource“ wird hier also ausgeweitet. Dadurch ist es möglich allgemein über Dinge, Konzepte und Beziehungen Aussagen zu treffen und dennoch eine eindeutige Referenz zu haben, die auch über Grenzen, wie verschiedene Webseiten oder Datenbanken, hinweg funktionieren kann.

Somit wird aus einem einfachen, alltäglichen Konzept des aktuellen Webs die Grundlage für eine maschinenlesbare Sprache und damit für die zuvor in Abschnitt 2.1 erwähnte semantische Annotation.



Abbildung 1: RDF Triples

2.2.1 Technischer Hintergrund

URIs¹⁶ wurden vom der IETF standardisiert. Eine lesenswerte Zusammenfassung (und Symbiose) verschiedener älterer Hypertext Systeme ist das Dexter Modell¹⁷.

2.3 Graphenstruktur

Es gibt eine Vielzahl von Datenstrukturen: Von einfachen Listen über Tabellen und Baumstrukturen hin zu Graphen. Die komplexeren Datenformate sind in der Regel die Obermenge der einfacheren. Graphen stehen in der Hierarchie ganz oben und können alle einfacheren Datenformate abbilden und verlustfrei integrieren.

Ein einfaches Gedankenexperiment zeigt dies: Sobald zwei Baumstrukturen miteinander verbunden werden entstehen schnell zirkuläre Referenzen. Werden diese aufgelöst erhält man einen Graphen¹⁸ und bricht damit die ursprüngliche Datenstruktur. Umgekehrt kann jedoch jede Baumstruktur in einem Graphen abgebildet werden, da ein Baum nur eine spezielle Form eines Graphen ist.

¹⁵ Tim Berners-Lee et al. 2005

¹⁶ Tim Berners-Lee et al. 2005

¹⁷ Frank G. Halasz 1990

¹⁸ Hitzler 2007, S. 43

Man könnte die These aufstellen, dass die meisten Strukturen in der Welt graphenorientiert sind, wie etwa das Gehirn, soziale Gefüge, das Ökosystem. Aus Gründen der Vereinfachung und Abstraktion werden sie jedoch meist auf Bäume und einfachere Strukturen (bewusst oder unbewusst) reduziert, um die Komplexität zu managen. Ein Beispiel hierfür wären Unternehmenshierarchien, die oft als Bäume aufgestellt werden. In der Realität sind die Beziehungen der Menschen in einem Unternehmen deutlich komplexer und entsprechen am ehesten einem Netzwerk.

Diese Vereinfachung kann auch problematische Seiten haben: Es kommt zu Informationsverlust. Die Reduktion auf einen kleineren Nenner zwingt Design und Strukturentscheidungen auf, die meist subjektiv sind. Dabei müssen oft Einschränkungen in Kauf genommen werden und nachträgliche Änderungen an der Struktur können sehr aufwendig werden.

Deswegen kann es sinnvoll sein die Komplexität einer Graphenstruktur in Kauf zu nehmen - vor allem wenn die Daten ihrer Natur nach graphenorientiert sind.

Das Semantic Web ist graphenorientiert. RDF Triples bestehen aus URIs. Sobald mehrere Aussagen (Triples) sich auf den gleichen URI beziehen, verknüpfen sich diese Aussagen zu einem gerichteten, benannten Multigraphen¹⁹.

Dazu ist es nicht nötig vorher ein Schema, also eine Struktur festzulegen. Die Struktur entsteht durch die Verknüpfungen und den Beziehungen von selbst und kann organisch mit dem Datenbestand mitwachsen.

Da Graphendatenbanken schemalos sind, werden sie als NoSQL Datenbanken eingeordnet.

2.3.1 Technischer Hintergrund

Die Graphenstruktur des Semantic Webs kann über die verschiedenen RDF Serialisierungsformate mit einem regulären Webserver ausgeliefert werden. Es gibt allerdings auch dedizierte Datenbanken die auf der Triple-Struktur von RDF aufbauen: Triplestores.

Diese Datenbanken unterstützen üblicherweise die von W3C standardisierte, graphenorientierte Abfragesprache SPARQL²⁰.

Auch unabhängig vom Semantic Web gewinnen Graphendatenbanken wie Neo4J²¹ und graphenorientierte Abfragesprachen wie Gremlin²² aktuell stark an Popularität.

¹⁹ Wikipedia-Autoren 2013

²⁰ Andy Seaborne und Steven Harris 2013

²¹ <http://neo4j.com/>

²² <https://github.com/tinkerpop/gremlin/wiki>

2.4 Trennung von Fakt und Interpretation

In Abschnitt 2.3 wurde bereits erwähnt, dass ein Graph kein Schema bzw. Strukturvorgaben benötigt. Dies macht Graphen zu einem relativ neutralen Datenformat, da Fakten nicht erst entsprechend eines Schemas transformiert werden müssen um in die Struktur zu passen. Im schlechtesten Fall ergeben sich viele isolierte Fakten die nicht miteinander in Zusammenhängen stehen, aber es ist möglich sie so zu erfassen.

Ein Schema kann allerdings Sinn ergeben um Zusammenhänge aufzuzeigen und herzustellen. Im Semantic Web gibt es ein sehr mächtiges Konzept um dies zu erreichen: Ontologien.

Ontologien basieren auf der Beschreibungslogik²³ (first-order-logic). Sie erlauben es auf einer Meta-Ebene die „Struktur der Welt“ zu definieren, anhand der neue Ableitungen möglich werden. Dadurch kann aus dem Faktenbestand auch neues, implizites Wissen geschlossen werden.

Ein interessanter Aspekt, der hier im Fokus stehen soll, ist folgender: Da die Fakten ohne Schema gespeichert werden können sind sie (relativ) neutral. Für weitere Interpretation kann eine Ontologie als zusätzliche Ebene darüber gespannt werden. Fakten und Interpretation sind also getrennt. Es ist möglich auf derselben Faktendatenbank unterschiedliche Ontologien zu entwickeln die zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen kommen, da sie andere Meinungen und Herangehensweisen vertreten.

Das schlussgefolgerte Wissen kann ebenfalls getrennt gespeichert werden. Damit kommen wir zu einem sauber getrennten dreiteiligem Prozess: (1) Faktenwissen wird durch (2) eine Ontologie interpretiert, woraus (3) neue Schlussfolgerungen entstehen.

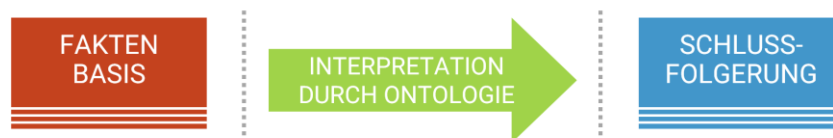


Abbildung 2: Trennung von Fakten, Interpretation und Schlussfolgerungen

Diese Trennung hat einige Vorteile: Es könnte sich herausstellen, dass die Interpretation falsch ist. Wenn nun eine Datenstruktur ein Schema (und damit eine Interpretation) voraussetzt bedeutet dies, dass alle Daten eventuell unter falschen Voraussetzungen erfasst worden sind und damit im schlimmsten Fall unbrauchbar sind. Ist beides getrennt, kann man eine neue Interpretation entwickeln und mit den alten Fakten zu anderen Schlüssen kommen.

Es kommt häufig vor, dass ein Modell über die Zeit wächst. Der Datenspeicherung macht dies aufgrund der Graphenstruktur nichts aus und die Ontologie

²³ Markus Krötzsch et al. 2014

kann dynamisch mit den Daten mitwachsen und eventuell auch entstehende Inkonsistenzen durch neue Regeln ausbügeln

2.4.1 Technischer Hintergrund

Auch hier gibt es mehrere W3C Standards: Das einfachere RDF Schema²⁴ (RDFS) hat die Grundlagen gelegt. Für komplexere Ontologien wurde OWL²⁵ entwickelt, das auch in verschiedenen Versionen mit unterschiedlicher Aussagestärke und Komplexität existiert.

2.5 Die Open World Assumption

Die OWA, (Open World Assumption) ist ein alternatives Konzept zur Closed World Assumption (CWA). Die OWA hat als Grundannahme, dass eine Wissensbasis immer potentiell unvollständig ist²⁶.

In einer geschlossenen Welt ist alles „falsch“, was nicht explizit als wahr bekannt und eingetragen ist. In einer offenen Welt gilt dieser Rückschluss nicht: Reicht die Datenlage nicht aus um sicher auf richtig oder falsch zu schließen ist das Ergebnis unbekannt²⁷. Alles was nicht ausgeschlossen wurde ist auch möglich.

Ein Beispiel: Folgender Fakt ist bekannt: „Peter“ „hat ein Kind“ „Harry“. „Harry“ „hat das Geschlecht“ „männlich“. In einer geschlossenen Welt wird daraus gefolgert, dass er genau ein Kind hat und alle Kinder männlich sind. In einer offenen Welt kann über beides keine Aussage gemacht werden, da Peter noch mehr Kinder haben könnte, von denen wir nichts wissen²⁸.

Die offene Welt Logik ist weniger restriktiv und mehr vermittelnd: Teilen sich etwa zwei Datensätze eine Aussage, die einmalig sein muss (wie eine ID), so werden diese Datensätze zusammengeführt, sofern dies nicht vorher ausgeschlossen wurde.

Dies hat zur Folge, dass die Logik deutlich komplexer werden kann und man mit der Möglichkeit rechnen muss, kein definitives Ergebnis zu bekommen. Dadurch eignet sich die OWA nicht sehr gut für Systeme, die bewusst geschlossen sein müssen und „harte“ Validation benötigen.

Doch die OWA spielt ihre Stärken aus, wenn es um die Aggregation von Informationen aus sehr unterschiedlichen Quellen geht. In der Realität ist Wissen fast immer unvollständig. Die Rückmeldung, dass ein Sachverhalt unbekannt ist, kann eine wichtige Information sein. Daten können bereits Widersprüche enthalten und durch die Zusammenführung verschiedener Quellen dazu noch neue entstehen.

²⁴ Dan Brickley und Ramanathan Guha 2004

²⁵ Markus Krötzsch et al. 2012

²⁶ Hitzler 2007, S. 150

²⁷ Michael K. Bergman 2009

²⁸ Baader 2003, S. 72–73

Ein System, das Unvollständigkeit und den Umgang mit Widersprüchlichkeiten von Anfang an mit in Betracht zieht hat kann hier bessere, bzw. angemessenere Ergebnisse erzielen.

3 Schlussbetrachtung

Die einzelnen Paradigmen konnten im Umfang dieser Arbeit natürlich nur oberflächlich angeschnitten werden, denn jedes ist ein Forschungsbereich für sich. Der Autor hofft, dass der Leser einen ersten Überblick und damit einige Gedankenanstöße mitbekommen hat und dadurch sein Repertoire erweitern konnte.

Ob sich das Semantic Web durchsetzt und breitere Adoption findet, steht zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch offen. Es ist davon auszugehen, dass die technischen Standards und deren Implementationen sich weiter ändern werden. Einige werden vielleicht durch bessere oder einfachere Ansätze ersetzt.

Vielleicht werden einige der hier vorgestellten Konzepte auch in anderen Kontexten Verbreitung finden. Neue Ideen entstehen bekanntlich oft durch die Kombination von bereits vorhandenen Konzepten, nicht selten aus verschiedenen Disziplinen

Literaturverzeichnis

Andy Seaborne; Steven Harris (2013): SPARQL 1.1 Query Language. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2013/REC-sparql11-query-20130321/>, zuletzt aktualisiert am 2013, zuletzt geprüft am 14.10.2013.

Antoine Isaac; Ed Summers (2009): SKOS Simple Knowledge Organization System Primer. Hg. v. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2009/NOTE-skos-primer-20090818/>, zuletzt aktualisiert am 18.08.2009, zuletzt geprüft am 31.10.2014.

Baader, Franz (2003): The description logic handbook. Theory, implementation, and applications. Cambridge, UK, New York: Cambridge University Press.

Dan Brickley; Ramanathan Guha (2004): RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-schema-20040210/>, zuletzt aktualisiert am 2004, zuletzt geprüft am 14.10.2013.

Eric Miller; Frank Manola (2004): RDF Primer. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2004/REC-rdf-primer-20040210/>, zuletzt aktualisiert am 2004, zuletzt geprüft am 14.10.2013.

Facebook (2014): Open Graph protocol. Online verfügbar unter <http://ogp.me/>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2014, zuletzt geprüft am 25.10.2014.

Frank G. Halasz (1990): The Dexter Hypertext Reference Model.

Gavin Carothers; Eric Prud'hommeaux (2013): Turtle. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2013/CR-turtle-20130219/>, zuletzt aktualisiert am 2013, zuletzt geprüft am 18.10.2013.

Google Inc.; Yahoo Inc.; Microsoft Corporation; Yandex: schema.org. Online verfügbar unter <http://schema.org/>, zuletzt geprüft am 24.10.2014/07.11.2014.

Hendrik Arndt (2006): Integrierte Informationsarchitektur. Die erfolgreiche Konzeption professioneller Websites: Springer.

Hitzler, Pascal (2007): The semantic web. Grundlagen // Proceedings. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer (Lecture notes in computer science, Vol. 4825). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-33994-6>.

- Ian Hickson (2014): HTML Microdata. Hg. v. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/microdata/>, zuletzt aktualisiert am 23.06.2014, zuletzt geprüft am 24.10.2014.
- Manu Sporny (2013): HTML+RDFa 1.1. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2013/REC-html-rdfa-20130822/>, zuletzt aktualisiert am 2013, zuletzt geprüft am 14.10.2013.
- Manu Sporny et al (2014): JSON-LD 1.0. Hg. v. W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/json-ld/>, zuletzt aktualisiert am 16.01.2014, zuletzt geprüft am 24.10.2014.
- Markus Krötzsch; František Simancík; Ian Horrocks (2014): Description Logics.
- Markus Krötzsch; Pascal Hitzler; Bijan Parsia; Peter Patel-Schneider; Sebastian Rudolph (2012): OWL 2 Web Ontology Language Primer (Second Edition). W3C. Online verfügbar unter <http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-primer-20121211/>, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 14.10.2013.
- Michael K. Bergman (2009): The Open World Assumption: Elephant in the Room. Online verfügbar unter <http://www.mkbergman.com/852/the-open-world-assumption-elephant-in-the-room/>, zuletzt aktualisiert am 21.12.2009, zuletzt geprüft am 01.11.2014.
- Nelson, T. H. (1965): Complex information processing, S. 84–100. DOI: 10.1145/800197.806036.
- O'Regan, Gerard (2012): A brief history of computing. 2nd ed. London, New York: Springer.
- Sankar, Shyam (2012): The rise of human-computer cooperation. Online verfügbar unter http://www.ted.com/talks/shyam_sankar_the_rise_of_human_computer_cooperation?language=en, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 31.10.2014.
- Tim Berners-Lee (2009): The next web. Hg. v. L. L.C. TED. Online verfügbar unter http://www.ted.com/talks/tim_berniers_lee_on_the_next_web.html, zuletzt aktualisiert am März 2009, zuletzt geprüft am 08.10.2013.
- Tim Berners-Lee; W3C/MIT; R. Fielding; Day Software; L. Masinter; Adobe Systems (2005): Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax. Hg. v. IETF. Online verfügbar unter <http://tools.ietf.org/html/rfc3986>, zuletzt aktualisiert am 2005, zuletzt geprüft am 31.10.2014.
- Wikipedia-Autoren, siehe Versionsgeschichte (2013): Resource Description Framework - Wikipedia, the free encyclopedia. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=580735405>, zuletzt aktualisiert am 08.11.2013, zuletzt geprüft am 12.11.2013.