

# Verwirrende Informatik IV - Semantik

Johannes Reich, johannes.reich@sap.com

6. Dezember 2022

## Zusammenfassung

Dieser Artikel ist der letzte einer Viererreihe, die eine Diskussion über die Grundlagen der Informatik anregen soll. In ihm wird der Beitrag der Informatik zu einem besseren Verständnis des Konzepts der Semantik oder Bedeutung von Zeichen in einer Interaktion dargestellt. Ausgangspunkt ist die Identifikation der Semantik von Information mit ihrer Verarbeitung im Sinne eines lokalen Modells der Bedeutungsverteilung innerhalb einer Interaktion. Analog des Aufbaus der Semantik formaler Sprachen wird eine Interaktionssemantik als Kombination einer Belegung der Zustandsvariablen in Verbindung mit einer mittels Entscheidungen determinierten Transitionsfunktion der an der Interaktion beteiligten Rollen modelliert. Dies ist die Welt der semantischen Protokolle, bzw. "Spiele in Interaktionsform" mit ihren künstlich beschränkten, eindeutigen Handlungskontexten. In ihr rücken die Entscheidungen der interagierenden Systeme in den Mittelpunkt und der Austausch von Zeichen wird zum Kopplungsmechanismus.

In einem weiteren Schritt wird die natürliche Sprache als Lösung des "Henne-Ei"-Problem verstanden, dass einerseits eine zielgerichtete Interaktion gegenseitiges Verständnis erfordert und andererseits die Herstellung eines gegenseitigen Verständnisses eine zielgerichtete Interaktion erfordert: das "simultaneous interaction and understanding (SIAU)" Problem. Vergleichbar dem "simultaneous localization and mapping (SLAM)" Problem ist dieses Problem iterativ unter Aufbau eines internen Modells in beständiger Interaktion mit der Welt zu lösen. Im Rahmen der Entwicklung der natürlichen Sprache macht dies den Aspekt der Unterscheidung zwischen (angenommenem) Relevantem und Irrelevantem bei der Bedeutungsverteilung verständlich.

Abschließend wird die Frage diskutiert, ob es dieser Artikelserie gelungen ist, die relevante Differenzierung der Konzepte von System, Interaktion, Zeichen, Zustand, Entscheidung, Freiheit, etc. vorzunehmen, und so die Informatik wieder ein Stück weit zu entwirren.

## 1 Einleitung

Dieser Artikel ist der vierte und damit letzte einer Viererreihe, die eine Diskussion über die Grundlagen der Informatik anregen soll. Im ersten hatte ich die Motivation geliefert und die meiner Ansicht nach die Informatik begründenden

Konzepte von System, Information, Berechenbarkeit und Daten vorgestellt. Im zweiten Teil hatte ich die Interaktion zwischen Systemen und die Koordination innerhalb von Systemen mit Hilfe des Kompositionskonzeptes thematisiert. Im dritten Teil bin ich auf das Verhältnis von Beschreibung und Beschriebenem eingegangen. Jetzt will ich noch der Frage nachgehen, welchen Beitrag die Informatik zum Verständnis des Konzepts der Semantik oder Bedeutung von Zeichen in einer Interaktion leisten kann.

Das altgriechische Wort "σημαντικός" (semantikos) wird gewöhnlich mit "bedeutend" oder "relevant" übersetzt. In unserer Sprache ist es für uns alltäglich über die Bedeutung von sprachlichen Ausdrücken zu reden – ganz sicher ist das Konzept der Bedeutung eines der Schlüsselkonzepte für unser Verständnis der Funktion unserer natürlichen Sprache.

Gerade auf dem Gebiet der Semantik muss sich die Informatik mit vielen anderen Disziplinen, wie der Philosophie, der Sprachwissenschaft oder der Soziologie auseinandersetzen und gerade hier kann sie meiner Ansicht nach einen sehr wertvollen Beitrag leisten. Das mag durchaus die überraschen, die Leslie Lamports salopper Formulierung, "Computer science is largely about computation" [14] zustimmen – und sich zu Recht fragen, welchen Mehrwert diese Art der Betrachtung im Bereich der Berechenbarkeit liefern soll. Tatsächlich bin ich ebenfalls der Auffassung, dass das Bedeutungskonzept hier wenig zu bieten hat.

Aber, wie schon im ersten Teil dieser Serie bemerkt, ist Informatik als Theorie der Interaktion viel mehr als nur ihr Teilbereich der Berechenbarkeit. Das Bedeutungskonzept beginnt dort seine Wirkung zu entfalten, wo die Interaktionen nichtdeterministisch und zustandsbehaftet werden. Wie wir sehen werden, legt uns die Informatik mit ihrer Unterscheidung zwischen Transport und Verarbeitung von Informationen und der offensichtlichen Irrelevanz der Bedeutung der Informationen für den Transport, ein leistungsfähiges Verständnis des Bedeutungskonzepts innerhalb solcher Interaktionen praktisch in den Schoß.

Bevor ich darauf näher eingehe, reiße ich zunächst kurz die historischen Wurzeln der heutigen Konzepte der Bedeutung an, wie sie sich schon die griechischen Philosophen der Antike ausgedacht hatten und zeige, dass diese Konzepte auch ganz aktuell, etwa in der Deutschen Normungsroadmap oder auch in der IEC unmittelbar fortwirken.

Dann wende ich mich in Abschnitt 3 dem Beitrag zu, den meiner Ansicht nach die Informatik zum modernen Verständnis des Konzepts der Bedeutung beitragen kann, wenn sie Bedeutungserteilung im Wesentlichen mit der Verarbeitung von Information gleichsetzt. Mit dieser Vorstellung können wir Semantik v.a. als Interaktionssemantik verstehen, die ich in Abschnitt 4 vorstelle und anhand des Spiels Tic Tac Toe illustriere.

In Abschnitt 5 wende ich mich schließlich der Semantik in der natürlichen Sprache zu, als Lösung des "Henne-Ei"-Problems, dass sich Interaktion und gegenseitiges Verstehen wechselseitig bedingen. Erst das Erfassen des iterativen Charakters der Lösung dieses Problems auf Basis einer inneren Modellbildung in Interaktion mit der Welt lässt uns die ganze Tragweite des Bedeutungskonzeptes erfassen mit seiner Unterscheidung zwischen Relevantem und Irrelevantem.

In Abschnitt 6 diskutiere ich die gewonnenen Erkenntnisse. In der Schluss-

betrachtung gehe ich zusammenfassend noch der Frage nach, ob mir die Entwirrung der Informatik, wie ich sie in den vergangenen Jahren vorgefunden habe, nun wenigstens ein Stück weit geglückt ist.

## 2 Die historischen Wurzeln unserer Vorstellung von Semantik

Schon die griechischen Philosophen des Altertums haben sich intensiv mit Fragen der Bedeutung auseinandergesetzt. Interessant für uns sind die Überlegungen von Aristoteles [2], der, anders als Platon mit dessen Ideenlehre, die Bedeutung der Laute oder Wörter sprachbezogen verstand, als dreistellige Beziehung zwischen dem Laut bzw. Wort, dem bezeichneten Ding und der vom Laut ausgelösten Vorstellungen. Im 19. Jahrhundert mitbegründete u.a. der Schweizer Ferdinand de Saussure die moderne Linguistik in dem er Sprache als ein Zeichensystem betrachtete, das in ein soziales System eingebettet ist. Dabei verstand er ein Zeichen als die Verbindung aus Zeichenform (signifiant) und Zeicheninhalt (signifié). Sein Zeitgenosse Charles S. Peirce verstand ein Zeichen hingegen in der Aristotelischen Tradition als dreistellige Relation zwischen dem materiellen Zeichen, dem Objekt, auf das sich das Zeichen bezieht, und dem geistigen Abbild des Zeichens im Interpreten, das von ihm so genannte "Interpretant" [20]. In ähnlicher Form sprachen Charles K. Ogden und Ivor A. Richards 1923 vom "semiotischen Dreieck" [19].

Entlang der Ideen des Behaviourismus unterschied Charles W. Morris in den 1930er Jahren zwischen Syntax, Semantik und Pragmatik [16]. Seiner Vorstellung nach beschreiben wir mit der Syntax die formale Struktur der Sprache, mit der Semantik die Beziehung zwischen den Zeichen und dem Bezeichneten und mit der Pragmatik die Beziehung zwischen den Zeichen und dem Interpreten im Sinne seiner Verwendung in konkreten Situationen.

Die Aktualität dieser Betrachtungen lässt sich daran ablesen, dass in der aktuellen DIN/DKE-Normungsroadmap I40 [5] direkt auf diese dreistellige Beziehung Bezug genommen wird, wobei die Dinge in die "reale Welt" und die Symbole und Begriffe in die "Informationswelt" verortet werden. Auch die Unterteilung in Semantik und Pragmatik findet sich dort. Entlang dieser Ideen positioniert die IEC [11] informatische Ontologien dann als "semantische Modelle", die IT-Applikationen mit semantischem Gehalt ausstatten und so die semantische Interoperabilität angeblich vereinfachen sollen.

Tatsächlich aber sind im 20. Jahrhundert ganz neue Ideen entstanden, die den Bedeutungsbegriff weniger phänomenologisch, deskriptiv, als vielmehr konstruktiv in einem anderen Licht erfassen. So wendete sich der späte Ludwig Wittgenstein eben gegen die Vorstellung, dass jedes Wort eine Bedeutung "hat" in dem Sinne, dass die Bedeutung etwa der "Gegenstand" ist, für welchen das Wort steht. Stattdessen schlug er vor [27] (Absatz 43): "Man kann für eine große Klasse von Fällen der Benützung des Wortes »Bedeutung« – wenn auch nicht für alle Fälle seiner Benützung – dieses Wort so erklären: Die Bedeutung eines

Wortes ist sein Gebrauch in der Sprache. ”

Um das Beispiel der Unterhaltung über Temperatur aus dem ersten Teil dieser Serie aufzugreifen: Unterhält sich eine über die Thermodynamik von Quantenvielteilchensysteme promovierte Physikerin mit ihrem 8-jährigen Sohn darüber, dass er heute, bei 30°C in der Schule, hitzefrei bekommen hat, dann haben beide sicherlich nicht genau denselben Begriff von Temperatur – und verstehen sich dennoch ausreichend gut.

Sprache wird zu einem Spiel, in dem ein kompetenter Sprecher die Regeln des Gebrauchs der Wörter kennen muss. Entsprechend kamen wesentliche Impulse zu einem besseren Verständnis, der Rolle von Bedeutung in einer Sprache, aus der Spieltheorie. Mit ihren Mitteln analysierte David Lewis [15] die Entstehung sozialer Konventionen und insbesondere den konventionellen Gebrauch sprachlicher Ausdrücke. Er betrachtete die gegenseitige Verständigung beim Austausch von Zeichen als ein Koordinationsproblem und führte Signalspiele als Analyseinstrument ein. In einem Signalspiel sendet ein Sender eine Nachricht in Abhängigkeit von seinem Zustand, so dass der Empfänger Kenntnis über diesen Zustand erhält und in der Lage ist, eine für beide Seiten vorteilhafte Handlung zu wählen. Eine Konvention ist dann eine Lösung eines solchen Koordinationsproblems, die mindestens zwei geeignete Koordinationsgleichgewichte enthält. Karl Warneryd [28] zeigte, dass solche Konventionen in evolutionären Kontexten auf natürliche Weise entstehen, basierend auf dem Konzept der evolutionären stabilen Strategien, wie es von John M. Smith und George R. Price [24] entwickelt wurde.

Ein wichtiger Aspekt dieser Gebrauchstheorie der Semantik ist ihre Betonung des interaktiven Charakter von Bedeutung. So stellte etwa Herbert P. Grice [7] fest, dass das Verstehen einer Äußerung darin besteht, zu erfassen was der Sprecher vermitteln wollte - und dass das, was traditionell als ”Bedeutung” verstanden wurde, nur lose damit verbunden ist. Erst kürzlich schlug K.M. Jaszczolt vor, dass man, um das Konzept der Bedeutung zu verstehen, ”nicht das Sprachsystem und seine Beziehung zum Kontext, sondern vor allem den Interaktionskontext selbst mit all seinen Mitteln der Informationsübermittlung” untersuchen muss ([12] pp.12-13).

### 3 Bedeutung in der Informationstheorie

Was ist nun der Beitrag der Informatik zu einem modernen Verständnis von Semantik? Wir hatten im ersten Artikel dieser Reihe gesehen, dass eine wesentliche Säule der Informationstheorie entlang der Ideen von Ralph V. L. Hartley, Claude E. Shannon und anderen ist, dass in den von ihr beschriebenen Interaktionen nur Informationen ”transportiert” werden. Daraus folgte unmittelbar, dass Bedeutung – im Sinne der Informatik – *nicht* transportiert wird.

Das verleiht Bedeutung in gewisser Weise etwas Magisches: Wie wird sie ”übertragen” ohne transportiert zu werden? Der Zusammenhang zwischen Magie und Bedeutungsverteilung ist in der Tat interessant: Die Zuschreibung magischer Eigenschaften lässt sich als eine fehlerhafte Bedeutungsverteilung verste-

hen. Einem Amulett wird eine Wirkung zugeschrieben, die es nicht hat; es werden Zaubersprüche aufgesagt, die keine Wirkung haben; es wird angenommen, dass Gegenstände Eigenschaften auf ihre Besitzer übertragen, die sie nicht haben; usw. (siehe auch [9]). Der Entwicklungspsychologe Jean Piaget beschreibt in seinem Modell der kognitiven Entwicklung von Kindern, dass eigentlich jedes Kind in der sogenannten "präoperationalen" Phase von 3-7 Jahren magisch denkt. Wolken regnen, weil sie traurig sind, die Ungeheuer warten im dunklen Keller, etc. Erst im Laufe einer gesunden kognitiven Entwicklung entwickeln wir Menschen ein realistisches Denken, das es uns dann auch ermöglicht, diesen Artikel mit seinem lokalen Modell der Bedeutungszuteilung durch Verarbeitung zu verstehen und für zutreffend – oder auch unzutreffend zu halten.

Wie in der Diskussion des ersten Teils dieser Reihe schon festgestellt, kann Bedeutung damit in einem informatischen Sinne nur durch die Verarbeitung "erteilt" werden. Ich gehe so weit, die Erteilung von Bedeutung mit der Verarbeitung von Information zu identifizieren. Tatsächlich spricht man in der Kryptologie in genau diesem Sinne von einer "semantisch" sicheren Verschlüsselung, wenn sich Informationen über den Klartext nur mit vernachlässigbarer Wahrscheinlichkeit aus dem Ciphertext extrahieren lassen [13].

Mit einem solchen Verständnis wird "semantische Interoperabilität" zu einem Pleonasmus, vergleichbar einem "weißen Schimmel". Interoperabilität bezieht sich schließlich per definitionem auf die wechselseitig abgestimmte Verarbeitung von Informationen verschiedener Systeme, die – dann wiederum per definitionem – gerade den semantischen Aspekt der Interaktion ausmacht. Die Objektorientierung wird zu einer semantischen Festlegung, da die Methoden eines Objektes die Verarbeitung seiner Daten bestimmen. Und die Unterscheidung zwischen Protokollen, die nur eine Transportoperation bereitstellen und solchen, die sich mit ihren Regeln auch auf die Verarbeitung der ausgetauschten Daten beziehen, lässt sich mit den Begriffen Transportprotokoll versus semantisches Protokoll abbilden.

## 4 Interaktionssemantik

Im dritten Teil dieser Serie hatten wir den zweistufigen Aufbau formaler Sprachen, bzw. Kalküle gemäß des Ansatzes von Alfred Tarski [25] beschrieben. Zunächst definiert man ihre Syntax als Menge aller korrekt formulierbaren Ausdrücke und dann in einem zweiten Schritt ihre Semantik als Belegung aller Variablen und anschließender Abbildung auf die gemeinten Entitäten.

Welchen der sprachphilosophischen Ansätze können wir mit der Informatik stützen? Eine Möglichkeit uns der Semantik ausgetauschter Zeichen anzunähern, ergibt sich aus der Idee, die Art wie wir die Semantik formaler Sprachen definieren, auf unsere Interaktionen zu übertragen. So erhalten wir eine "Interaktionssemantik". Dazu müssen wir festlegen wie wir Interaktionen beschreiben und innerhalb dieser Beschreibung müssen wir die Belegung und die Interpretationsfunktion identifizieren [22].

Wie im zweiten Teil der Serie aufgezeigt, beschreiben wir Interaktionen

mit Spielen in Interaktionsform (GIFs). Diese sind Protokolle, deren Transitionsrelation wir mit einem zusätzlichen Eingabealphabet, den Entscheidungen, determiniert haben. Protokolle hatten wir durch die Kopplung von I/O-Transitionssystemen (I/O-TSen) über gemeinsame I/O-Komponenten so konstruiert, dass die Ausgabezeichen eines "sendenden" I/O-TSs zu Eingabezeichen eines "empfangenden" I/O-TSs wurden.

Betrachten wir die Zustandsfunktionen der Systeme als Variablen (wie sie ja auch teilweise genannt werden), so lassen sich die Zustandswerte der I/O-TSe als Belegungen dieser Variablen ansehen. Als Interpretationsfunktion kommt nur die durch die deterministische Transitionsrelation festgelegte Transitionsfunktion des GIFs in Frage.

Damit ergibt sich die Bedeutung eines Eingabezeichens  $i$ , zusammen mit einer Entscheidung  $d$ , bei einem gegebenen Zustandswert  $p$  zum Zeitpunkt  $t$  durch das Ausgabezeichen  $o$  und den neuen Zustandswert  $q$  zum Zeitpunkt  $t' = t + 1$ :  $(o, q) = \text{Interp}|_p(i, d)$ . Das entspricht genau der Vorstellung, dass die Verarbeitung der Informationen synonym mit der Erteilung der Bedeutung ist.

Interessanterweise rückt dieses Bedeutungsmodell die Entscheidungen in den Mittelpunkt. Betrachten wir die Entscheidungen als maßgeblich und die I/O-Zeichen nur als Kopplungsmechanismus, dann können wir alle Zustände, die wir ohne weitere Entscheidung, bzw. unter  $\epsilon$ -Entscheidung ansteuern, also nur unter Vermittlung von ausgetauschten Zeichen, als äquivalent ansehen. Diese Zustandsmenge können wir  $\epsilon$ -Hülle oder Entscheidungsabschluss des Zustandes nennen, der Ausgangszustand der entsprechenden Entscheidung war. Mit dem bekannten Verfahren der  $\epsilon$ -Elimination können wir dann zu einem deterministischen Automaten übergehen, den ich Entscheidungsautomat nenne, der diese  $\epsilon$ -Hüllen als Zustandswerte und nur die Entscheidungen als Eingabealphabet hat.

Dieser Automat ist ein Spiel im traditionellen Sinne der Spieltheorie (abgesehen von der Nutzenfunktion der Spieler). Wir können also sagen, dass ein solches Spiel durch die Abstraktion von der Interaktion exklusiv die Bedeutung der Entscheidungen darstellt.

## 4.1 Beispiel: Tic Tac Toe

Ich illustriere das Spielkonzept und das der Semantik der ausgetauschten Zeichen sowie der Entscheidungen mit dem einfachen Spiel Tic Tac Toe. Als Spiel mit sogenannter "perfekter Information" erhalten alle Spieler Kenntnis über alle Zustandsänderungen sobald sie stattfinden.

In Abb. 1 stelle ich das Spiel in seiner Extensivform dar. Der Spielzustand wird dabei durch ein gemeinsames 3x3-Felder großes Spielfeld beschrieben, das ich durch einen 9-elementigen Vektor  $b[1 \dots 9]$  repräsentiere. Der Spielverlauf wird durch einen gerichteten Graphen repräsentiert, dessen Knoten zusätzlich zum Spielfeld den Spieler anzeigen, der gerade am Zug ist und dessen Kanten die Spielzüge darstellen.

In Abb. 2 beschreibe ich Tic Tac Toe in seiner Interaktionsform, d.h. als durch hinzugefügte Entscheidungen determiniertes Protokoll, in der sich zwei

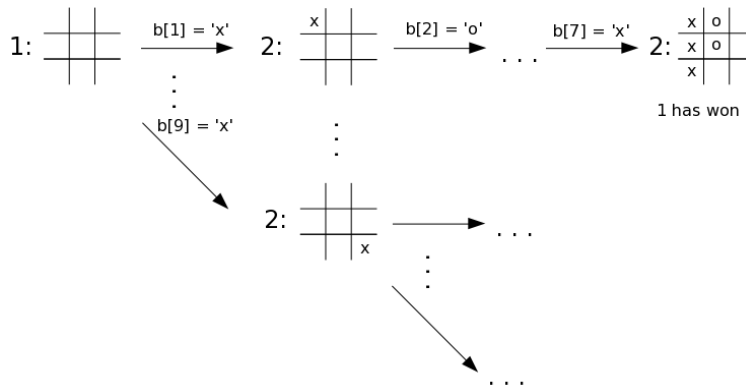


Abbildung 1: Das Tic Tac Toe Spiel in seiner Extensivform bezogen auf ein Spielfeld  $b$ .

Spieler ihre Züge gegenseitig mitteilen. Dabei verwende ich die im ersten Artikel dieser Serie eingeführte Äquivalenzklassenkonstruktion für Protokolle zur Vereinfachung der Darstellung. Der Zustand eines Spielers zerlegt sich in eine die Interaktion steuernde Hauptkomponente (Modus) sowie eine eigene Repräsentation  $b_i$  ( $i = 1, 2$ ) des Spielfeldes.

Und zum Schluss, in Abb. 3, zeige ich Tic Tac Toe als Entscheidungsautomat, der die folgenden 5  $\epsilon$ -Hüllen als Zustandswerte aufweist: '1 has won', '2 has won', 'draw', '1's turn' und '2's turn'.

Jede  $\epsilon$ -Hülle hat ein Element, das den Endpunkt einer Interaktionskette darstellt. In jedem dieser Endpunkte sind die inneren Zustände beider Spieler, die das Spielbrett repräsentieren, gleich, d.h. es gilt dann  $b_1 = b_2$ . Beziehen wir uns auf diese  $\epsilon$ -Hüllen, können wir daher auch von einem gemeinsamen Spielbrett reden, "auf" dem zusammen gespielt wird. Das entspricht unserem Ausgangspunkt des Spiels in seiner Extensivform aus Abb. 1.

Die Bedeutung der ausgetauschten Zeichen 1...9 liegt offensichtlich in der Kopplung der Interaktion auf eine Weise, dass die Interaktion "sinnvoll", also wie intendiert, ablaufen kann. D.h. sie liegt darin, dass jeder Spieler auf Grundlage des empfangenen Zeichens nun seinerseits einen weiteren Zug machen kann, bzw. ggfs. erkennt, dass das Spiel verloren ist oder unentschieden ausging. Die Bedeutung der getroffenen Entscheidungen wird durch den Entscheidungsautomaten dargestellt.

Nun können wir die Eingangsfrage von Abschnitt 4 beantworten: Dieser Ansatz verzichtet gänzlich auf den Verweis auf "abstrakte" Begriffe, über die der Interakteur verfügung müsste, um die Bedeutung der ausgetauschten Zeichen zu erfassen, sondern er stützt klar die Gebrauchstheorie. Ja, er präzisiert sie (wie zu erwarten), als die ausgetauschten Zeichen als Teil der Regeln anzusehen sind, nach denen die Interaktion abläuft und lenkt den Fokus auf die Entscheidungen, wie sie die Spieltheorie versteht.

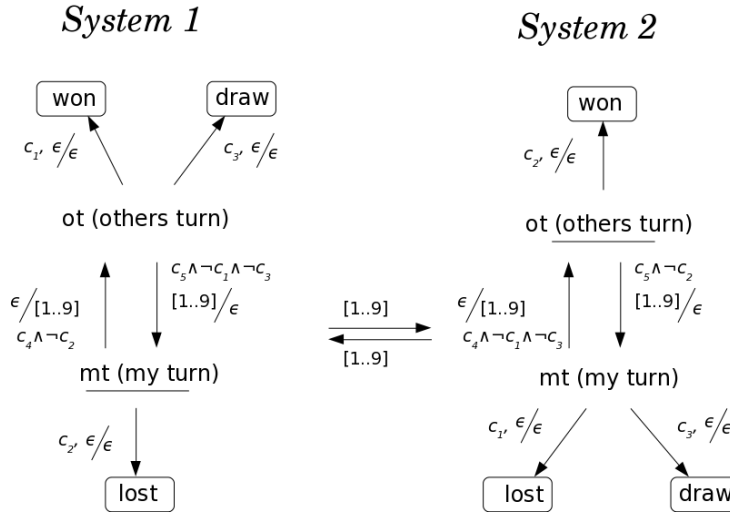


Abbildung 2: Zwei Systeme spielen Tic Tac Toe. Es wird nur die Hauptkomponente des jeweiligen Systemzustandes gezeigt. System 1 fängt an und ist initial im Zustand mit der Hauptkomponente 'mt (my turn)', während System 2 initial in der Hauptkomponente seines Zustands den Wert 'ot (others turn)' inne hat. Zur Abkürzung verwende ich die folgenden Ausdrücke, die sich auf das "interne" Spielbrett  $b_i$  beziehen:  $c_1$  ist wahr, wenn Spieler 1 gewonnen hat,  $c_2$  ist wahr, wenn Spieler 2 gewonnen hat,  $c_3$  ist wahr, wenn das Spiel unentschieden ausgegangen ist,  $c_4(b_i, k)$  ist wahr, wenn die  $k$ -te Position des Spielbretts  $b_i$  leer ist und  $c_5(b_i, \$k)$  ist wahr, wenn die '\$k'-te Position des Spielbretts  $b_i$  leer ist.

## 5 Semantik in der natürlichen Sprache

Schon Gerard Holzmann [10] hatte auf die Ähnlichkeit zwischen Protokollen und unserer natürlichen Sprache hingewiesen. Aus technischer Sicht sprechen wir von mindestens drei verschiedenen Sprachen, wenn es um Interaktionen geht. Wenigstens zwei davon verwenden wir, um *über* Interaktionen zu sprechen. Dies sind unsere normale (Ingenieur-)Sprache und vielleicht einige formale Programmiersprachen. Und dann gibt es noch die Interaktion selbst, die wir nun ebenfalls als eine Sprache betrachten können. Das ist die Sprache, die uns interessiert. Um sie von den anderen zu unterscheiden, nenne ich sie "Interaktionssprache (I-Sprache)" [3]<sup>1</sup>.

Mit dem dargestellten Modell der Interaktionssemantik können wir nun sagen, was wir unter der Intention einer Sprecherin verstehen – nämlich ihre An-

<sup>1</sup>Der Term "I-Sprache" wurde von Noam Chomsky als "I"- versus "E"-Sprache mit einer anderen Bedeutung verwendet [1]. Er versuchte damit zwischen einer intensionalen Sprache, die sich auf das interne sprachliche Wissen bezieht, und einer extensionalen Sprache, die sich auf die beobachtbare Sprache bezieht, die Menschen tatsächlich produzieren, zu unterscheiden.

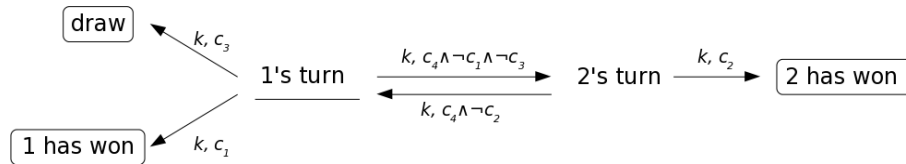


Abbildung 3: Das Tic Tac Toe Spiel mit einem Spielbrett als vereinfachter (deterministischer) Entscheidungsautomat.

nahme über die zu wählende Transition und deren Kontext der Transitionsrelation des Hörers. Und wir können beschreiben, was es für einen Hörer bedeutet, die Intention einer Sprecherin zu verstehen: nämlich selbst die von der Sprecherin intendierte Transitionsrelation aufzuweisen und die indentierte Transition auszuwählen – ich verweise auf das Tic Tac Toe Beispiel.

Wir haben aber noch nicht erklärt, wie es dazu kommt, dass sich Sprecher und Hörer tatsächlich verstehen. Dazu müssen beide einen adäquaten, aufeinander bezogenen Kontext im Sinne einer konsistenten Transitionsrelation herstellen. Offensichtlich lösen wir Menschen mit unserer I-Sprache das zirkuläre oder "Henne-Ei"-Problem, dass einerseits eine zielgerichtete Interaktion mit einem anderen Menschen gegenseitiges Verständnis erfordert und andererseits die Herstellung eines gegenseitigen Verständnisses eine zielgerichtete Interaktion erfordert.

Für Probleme dieser Henne-Ei-Klasse bietet die Informatik weitere, mittlerweile gut verstandene Beispiele, etwa das "simultaneous localization and mapping (SLAM)"-Problem (z.B. [26]): Einerseits brauche ich, um die eigene Position in einem Gelände zu bestimmen, eine Karte. Andererseits muss ich, um die Karte zu bestimmen, meine eigene Position kennen.

Eine naheliegende Lösungsstrategie für solche Henne-Ei-Probleme ist iterativ: Ein internes Modell wird durch beständigen Kontakt mit der Umgebung zunehmend verbessert. In Anlehnung an das Akronym SLAM schlage ich vor, vom "gleichzeitige Interaktion und Verstehen (simultaneous interaction and understanding, SIAU)"-Problem zu sprechen [22].

Die Anforderung der internen Modellbildung macht auch verständlich, warum Semantik in der natürlichen Sprache im Kern das Relevante vom Irrelevanten unterscheidet. Das interne Modell kann nicht "fotografisch" erstellt werden, mit allen nur möglichen erfassbaren Details, sondern aus Effizienzgründen beschränkt auf das als "wesentlich" Erkannte. Diese interne Modellbildung erfordert somit, das Relevante vom Irrelevanten zu unterscheiden – und kann entsprechend sowohl zutreffend als auch unzutreffend sein.

Damit wird Bedeutung auch für unser ingenieurmäßiges Verständnis unserer natürlichen I-Sprache zu einem Schlüsselkonzept. Unser Modell der Interaktion weist dabei dem Subjekt eine aktive Rolle zu, weil schon die interne Modellbildung interaktionsorientiert erfolgt und damit von den Entscheidungen des Subjekts geprägt wird. Diese Auffassung erklärt zum einen die Relevanz des

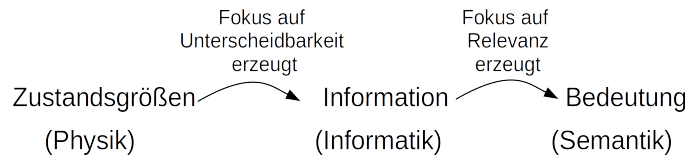


Abbildung 4: Die Beziehung der Konzepte der physikalischen Zustandsgröße, der Information und der Bedeutung.

Bedeutungsbegriffs wie auch seine Unbestimmtheit. In Abb. 4 verdeutliche ich dieses Verhältnis zwischen den Konzepten der physikalischen Zustände, der Information und der Bedeutung.

## 6 Diskussion

Meiner Ansicht nach gibt uns die Informatik mit dem Konzept der Information, die sich einerseits – semantikkfrei – transportieren lässt und andererseits – semantikbehaftet – verarbeitet werden kann, den Schlüssel für ein leistungsfähiges Verständnis von Semantik an die Hand. Dieses Verständnis ist genauer besehen zweistufig. Zunächst hatten wir die Erteilung von Bedeutung mit der Verarbeitung von Informationen im Rahmen einer wohldefinierten Interaktion gleich gesetzt und diese Verarbeitung "regulatorisch" verstanden. Und dann haben wir festgestellt, dass sich der Erwerb der natürlichen Sprache als iterative Lösung des SIAU-Problems verstehen lässt, in der interne Modelle in Wechselwirkung mit der Umwelt geschaffen werden müssen, die natürlichweise, maßgeblich beeinflusst durch die Entscheidungen des Subjekts, Wesentliches von Unwesentlichem unterscheiden.

Damit zeigt die Informatik zum einen die Unzulänglichkeit der klassischen Semiotik und sie liefert auch keine Unterstützung für eine ausreichend klare Unterscheidung zwischen Semantik und Pragmatik im Sinne von Charles W. Morris.

Eine weitere Konsequenz ist ein etwas modifiziertes Verständnis der Spieltheorie als einer Theorie der Bedeutung von Entscheidungen. Insbesondere nehmen wir dem Ansatz der Signalspiele seinen ad hoc Charakter, da traditionelle Spiele sowohl in ihrer strategischen als auch in ihrer extensiven Form mit ihrem exklusiven Fokus auf Zustände, Entscheidungen und Nutzen (oder einer anderen Form der Präferenzbewertung) vom Austausch von Informationen, also der eigentlichen Interaktion, explizit abstrahieren.

Ebenso wirken eine ganze Reihe der von ihren Befürwortern so genannten "semantischen Technologien" gar nicht mehr so sehr "semantisch". Warum? Zunächst ist nicht so ganz klar, was mit "semantisch" im Zusammenhang mit "Technologie" gemeint ist. Nach meinem Verständnis sind es Technologien die für die maschinelle Verarbeitung von "Bedeutungen" hilfreich sein sollen.

Ein Beispiel dafür sind meiner Ansicht nach die sogenannten informatischen Ontologien (z.B. [8]), die ich im dritten Artikel dieser Serie schon thematisiert

hatte. Da genau genommen nur Informationen und nicht "Bedeutungen" maschinell verarbeitet werden können, benötigt jede maschinelle Verarbeitung von "Bedeutungen" ein zugrunde liegendes Bedeutungsmodell, das sich durch Informationen repräsentieren lässt. Was ist das Bedeutungsmodell von Ontologien? Es ist das formaler Sprachen, dass also die Bedeutung eines Terms, der sich als Zustandwert repräsentieren lässt, gegeben ist durch eine Abbildung auf einen Gegenstand oder eine Äquivalenzklasse von Gegenständen unserer Alltagswelt, die letztlich der Mensch vornimmt.

Ich würde Ontologien daher eher als formale denn als "semantische" Technologie betrachten, weil sie nur unter der Gültigkeit der Annahme, dass die von ihr bezeichneten Begriffe hinreichend klar sind, ihre Wirkung entfalten können. Diese Annahme ist aber häufig falsch. Will man bspw. die Terme "Käufer" "Verkäufer" "haben" "Vertrag" und ihre Relation mit Bedeutung erfüllen, muss man landesspezifisch dicke juristische Bücher wälzen und liegt, wie unzählige, z.T. nur schlecht vorhersagbare Gerichtsentscheidungen über die Frage, ob nun ein Vertrag vorlag oder nicht, zeigen, trotzdem immer wieder daneben.

Für die effiziente Herstellung von Interoperabilität von IT-Applikationen verweisen unsere Überlegungen daher weniger auf vermeintliche oder auch tatsächliche semantische Technologien, sondern im Rahmen der ersten Stufe der Semantik zunächst einmal auf alle Technologien, die die Implementierung semantischer Protokolle vereinfachen. Und man müsste das zentrale aktuelle Problem lösen, das die effiziente Herstellung von Interoperabilität von IT-Applikationen strukturell vereitelt, nämlich dass schon kleine Änderungen in der Struktur einer Interaktion zu einer großen Änderung der Struktur der Berechnung der Systemfunktion der beteiligten Prozesse führen können. Dies ist meiner Ansicht nach durch die Entwicklung einer, schon in [23] angesprochenen, interaktionsorientierten Applikationsarchitektur möglich, bei der die Rollen und damit sowohl ihre Interaktion als auch ihre Koordination in der Struktur der IT-Applikation identifizierbar bleiben.

## 7 Schlussbetrachtung: Entworrene Informatik

Ich hatte diese Artikelserie eingeleitet mit einer Aufzählung von Dingen, die die Informatik auf den ersten Blick verwirrend erscheinen lässt. Das waren vor allem die Vermischung von interaktionaler und struktureller Perspektive auf zusammengesetzte Systeme, die wesentlichen Rollen von Zustand und Determinismus und Nichtdeterminismus innerhalb dieser Perspektiven sowie das komplexe Verhältnis zwischen Beschreibung und Beschriebenem in der natürlichen Sprache.

Meine Behauptung war, dass sich diese Verwirrung mit Hilfe der Mathematik und ihrem Konzept der Struktur und der Komposition auflösen lässt. Die Frage ist: Ist die Entwirrung gelungen?

Natürlich bleibt die Antwort auf diese Frage letztlich Ihnen, der Leserin oder dem Leser überlassen. Als Hilfestellung will ich noch einmal kurz die vorgenommene genauere Betrachtung dieser Artikelserie rekapitulieren, warum aus informatischer Perspektive System nicht gleich System, Interaktion nicht gleich

Interaktion, ausgetauschte Zeichen nicht gleich ausgetauschte Zeichen, Zustand nicht gleich Zustand, Entscheidung nicht gleich Entscheidung und Freiheit nicht gleich Freiheit ist. Was waren die relevanten Unterschiede?

Systeme zeigen innerhalb von Interaktionen sehr unterschiedliches Kompositionsverhalten. Ihre Interaktion kann durch die Komposition ihrer Systemfunktionen zur Bildung von Supersystemen führen, muss es aber (glücklicherweise) nicht. Es ist sicherlich vorteilhaft wenn wir die Systeme so beschreiben, dass wir das eine vom anderen möglichst gut unterscheiden können. Dabei war die Unterscheidung zwischen deterministischem und nichtdeterministischem Verhalten wesentlich. Unter der Voraussetzung, dass Zustandsfunktionen nur einzelne Werte repräsentieren, können wir nämlich nur die ersteren mathematisch durch Funktionen charakterisieren, die Zustandswerte auf Zustandswerte abbilden.

Eine deterministische Interaktion ermöglicht eine strukturelle, direkt auf die funktionale Komposition bezogene Beschreibung der Systeme, wo die Intelligenz sozusagen in der Komposition steckt. Eine nichtdeterministische, zustandsbehaltete Interaktion lässt sich hingegen mit dem interaktionsbezogenen Protokoll- bzw. Spielkonzept erfassen, wo die Intelligenz in den Teilnehmerrollen steckt mit der die Entscheidungen den Nichtdeterminismus der Interaktion ausfüllen.

Das Konzept der Entscheidung ist offensichtlich komplex. Zunächst hatte ich es nur als Fiktion eingeführt, um die Lücke zu füllen, die durch die Nichtdeterminiertheit der Interaktion entsteht, sozusagen als ein Konzept, das die isolierte Betrachtung konsistenter Interaktionen eines Systems ermöglicht, das in Wirklichkeit nur teilweise isolierbar ist. Denn diese Lücke kann, wie gezeigt, auch durch andere Interaktionen gefüllt werden. Insofern wurden wir, indem wir die interaktiven Systeme als Ganzes betrachtet haben, ganz natürlich auf die Frage nach der tatsächlichen "Freiheit" einer Entscheidung gelenkt.

Meiner Ansicht nach modifiziert der Ansatz der Interaktionssemantik unser Verständnis der Spieltheorie. Während die traditionelle Sichtweise, wie sie etwa von Roger B. Myerson zum Ausdruck gebracht wird [17], die Spieltheorie als "*die Untersuchung mathematischer Modelle von Konflikten und Kooperationen zwischen intelligenten, rationalen Entscheidungsträgern*" definiert, können wir nun sagen, dass in unserem Sinn sich die traditionelle Spieltheorie mit der Bedeutung von Entscheidungen in nichtdeterministischen Interaktionen beschäftigt.

Von der Spieltheorie zur Ökonomie ist es nicht weit. Tatsächlich zeigt sich hier die Tragweite des Rollenkonzeptes und präzisiert diesbezügliche Ansätze der Soziologie [6]. So lässt uns seine zentrale Dualität von externer Interaktion und interner Koordination der Rollen eines Subjekts beispielsweise die Funktion von Geld besser verstehen [21]. Zum einen seine Funktion, unsere materiellen Präferenzen in einzelnen, geldbasierten Austauschinteraktionen im Vergleich zu anderen Menschen auszudrücken und zum anderen – Geld kann man nur einmal ausgeben – seine Funktion als Mittel der Koordinierung unserer diversen Rollen zu wirken. Und entsprechend der aufgezeigten Möglichkeiten, über zusätzliche Interaktionen sowohl zusätzliche Entscheidungsfreiheit als auch zusätzliche Zwänge zu ermöglichen, impliziert Geld als sozialer Koordinierungsmechanismus je nach den Regeln seiner Verteilung die Ambivalenz beides zu ermöglichen: Unsere materiellen Präferenzen fair gegenüber allen anderen ausdrücken – oder in

sklavische Abhängigkeit zu fallen.

D.h. meiner Ansicht nach trägt die Informatik mit diesem Rollen-basierten, dualen Modell aus externer Interaktion und innerer Koordination eines Systems zu einem besseren Verständnis der Komplexität und insbesondere der Fragilität des Freiheitbegriffs bei. Zum einen liefert sie eine einfache notwendige Voraussetzung für freies Handeln, nämlich dass kleine Änderungen in den Interaktionen auch nur kleine Änderungen in der Struktur der interagierenden Subjekte zur Folge haben darf, Anpassungen also "einfach" sind. Und dieser Fokus, Freiheit im Handeln durch die Fähigkeit zur Anpassung gegenüber Änderungen testabel zu machen, liefert dann auch ein gutes Kriterium für das Ausmaß tatsächlicher Freiheit: Es ist das Ausmaß unserer Fähigkeit uns, ausgerichtet an unseren originären Zielen, flexibel und eigenständig an notwendige oder gewollte Veränderung in unseren Interaktionen im Sinne einer veränderten Koordination veränderter Rollen einzustellen oder anzupassen.

Der Ansatz der Interaktionssemantik ermöglicht es darüber hinaus auch, über die Interaktion zwischen Maschine und Mensch einheitlicher zu denken – zum Vorteil des Menschen. So wird zum einen die Frage, ob Maschinen Entscheidungen treffen können oder sollten, präzisiert zu der Frage, ob sie "freie" Entscheidungen treffen können. Und über alle eher philosophischen Erwägungen hinaus wird ganz konkret deutlich, was es bedeutet, dem Menschen in der Interaktion mit Maschinen, aber auch mit anderen Menschen, Entscheidungsspielräume einzuräumen oder ihn stattdessen zu funktionalisieren, wie es etwa die Initiative WS-Task [18] oder das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 [4] vorgenommen haben, wobei letzteres die Kommunikationsfähigkeit des Menschen mit der einer Schraube auf eine Stufe stellte: Der Mensch als Aufgabenarbeiter, zudem noch ohne Ethernet-Schnittstelle – was für eine Ignoranz gegenüber einer seiner zentralen Fähigkeiten, ad hoc den relevanten Kontext einer Interaktion zu bestimmen und innerhalb dieses Kontextes dann ausreichend gute Entscheidungen zu treffen.

Insofern hoffe ich, Sie als Leserin oder Leser dafür habe gewinnen zu können, es auch in der Informatik mit der Begriffsbildung genau zu nehmen, um die erwähnten Quellen akzidentieller Komplexität zu meiden und sich stattdessen, zusammen mit mir um so mehr an ihrer essentiellen Komplexität weiter zu erfreuen.

## Literatur

- [1] N. Araki. Chomsky's I-language and E-language. *Hiroshima Institute of Technology Research*, pages 17–24, 2017.
- [2] Aristoteles. *Organon Band 2: Kategorien / Hermeneutik oder vom sprachlichen Ausdruck*. Meiner, Verlag für Philosophie, 1998. Herausgegeben von Hans Günter Zekl.
- [3] F. Bangemann, C. Diedrich, and J. Reich. A model for the semantics of component interactions of cyber-physical systems. In *Industrial Electronics*

- (ISIE), 2016 IEEE 25th International Symposium on, pages 1042–1047. IEEE, 2016.
- [4] DIN. SPEC 91345:2016-04 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), 2016.
- [5] *Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0, Version 4*. DIN e.V. und DKE, 2020.
- [6] E. Goffman. *The presentation of self in everyday life (dt.: Wir alle spielen Theater)*. University of Edinburgh Social Sciences Research Centre, 1959.
- [7] H. P. Grice. *Studies in the Way of Words*. Harvard University Press, 1989.
- [8] T. R. Gruber. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? *International Journal of Human-Computer Studies*, 43(5):907–928, 1995.
- [9] T. Grüter. *Magisches Denken*. Scherz Verlag, Frankfurt, 2010.
- [10] G. J. Holzmann. *Design and validation of computer protocols*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1991.
- [11] *Semantic interoperability: challenges in the digital transformation age*. IEC, 2019.
- [12] K. M. Jaszczolt. *Meaning in linguistic interaction: semantics, metasemantics, philosophy of language*. Oxford University Press, 2016.
- [13] J. Katz and Y. Lindell. *Introduction to Modern Cryptography*. Chapman & Hall/CRC, 2 edition, 2015.
- [14] L. Lamport. Computer science and state machines. In *Concurrency, Compositionality, and Correctness*, pages 60–65. Springer, 2010.
- [15] D. Lewis. *Convention: A Philosophical Study*. Harvard University Press, 1 edition, 1969.
- [16] C. W. Morris. Foundations of the Theory of Signs. In *International encyclopedia of unified science. Vol. 1, #2*, pages 1–59. Chicago University Press, 1938.
- [17] R. B. Myerson. *Game Theory: Analysis of Conflict*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1991. reprinted 1997 as paperback.
- [18] OASIS. Web Services – Human Task (WS-HumanTask) Specification Version 1.1, 2010. <http://docs.oasis-open.org/bpel4people/ws-humantask-1.1.pdf> called 2021-03-21.
- [19] C. K. Ogden and I. A. Richards. *The meaning of meaning: A study of the influence of thought and of the science of symbolism*. Harcourt, Brace & World, Inc., 1923.

- [20] C. S. Peirce. What is a sign? In N. Houser, J. R. Eller, A. C. Lewis, A. De Tienne, C. L. Clark, and D. B. Davis, editors, *The essential Peirce: selected philosophical writings*, volume 2, pages 4–10. Indiana University Press, 1992.
- [21] J. Reich. Money as a social coordination mechanism to fairly express our free material preferences. *preprint*, doi:10.13140/RG.2.2.31937.99681/1, 2020.
- [22] J. Reich. A theory of interaction semantics. *preprint arXiv:2007.06258*, 2020.
- [23] J. Reich. Komposition und Interoperabilität von IT-Systeme. *Informatik Spektrum*, 40:339–346, 2021.
- [24] J. M. Smith and G. R. Price. The logic of animal conflict. *Nature*, 246(5427):15–18, 1973.
- [25] A. Tarski. Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen. *Studia Philosophica. Commentarii Societatis Philosophicae Polonorum*, 1:261 – 405, 1935. Auch in: Tarski, Givant, McKenzie (1986), S. 53 – 197.
- [26] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox. *Probabilistic Robotics*. The Mit Press, 2005.
- [27] L. Wittgenstein. *Philosophische Untersuchungen. Kritisch-genetische Edition*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Frankfurt, 2001.
- [28] K. Wärneryd. Cheap talk, coordination, and evolutionary stability. *Games and Economic Behavior*, 5(4):532–546, 1993.