



Fakultät II – Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften  
Department für Informatik

Informatik

Masterarbeit

***Entwurf eines Prozesses zur Formalisierung  
sicherheitsrelevanter Phänomene für das  
automatisierte Fahren***

vorgelegt von

***Arlena Wellßow***

Gutachter:

**Prof. Dr. Martin Fränze**

**Dr. Christian Neurohr**

Oldenburg, 7. März 2022



---

## Abstract (Eng)

With the advancing development in the field of automated driving, validation of the systems being used is gaining in importance. A vehicle could complete several hours of operation without encountering any safety-relevant situations, yet such situations are necessary for a meaningful validation argument. Therefore it is imperative for an efficient safeguarding process to compile influential elements occurring in road traffic in such a way that as many real-world, safety-relevant factors as possible are covered while maintaining manageability and scalability through suitable abstraction. One approach is to perform a criticality analysis, which identifies these influencing factors of the traffic world and describes them on an adequate abstraction level in the form of criticality phenomena. With this work, a process for the formalization of criticality phenomena is developed, which starts with the recognition of criticality phenomena and extends to the automated evaluation.

Mit der fortschreitenden Entwicklung im Bereich des automatisierten Fahrens gewinnt die Validierung der eingesetzten Systeme immer mehr an Bedeutung. Ein Fahrzeug kann mehrere Betriebsstunden absolvieren, ohne dass es zu sicherheitsrelevanten Situationen kommt, doch sind solche Situationen für eine aussagekräftige Validierung notwendig. Daher ist es für ein effizientes Absicherungsverfahren zwingend erforderlich, die im Straßenverkehr auftretenden influentiellen Elemente so zusammenzustellen, dass möglichst viele reale, sicherheitsrelevante Faktoren abgedeckt werden und gleichzeitig die Handhabbarkeit und Skalierbarkeit durch geeignete Abstraktion erhalten bleibt. Ein Ansatz ist die Durchführung einer Kritikalitätsanalyse, die diese Einflussfaktoren der Verkehrswelt identifiziert und auf einer angemessenen Abstraktionsebene in Form von Kritikalitätsphänomenen beschreibt. Mit dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen entwickelt, das bei der Erkennung von Kritikalitätsphänomenen beginnt und bis zur automatisierten Auswertung reicht.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>15</b>
2.1	Kritikalitätsphänomene und ihre Relationen . . . . .	15
2.2	Die Problematik des offenen Kontexts . . . . .	17
2.3	Beschreibungslogiken und Ontologien . . . . .	18
2.4	Zeitliche Logiken . . . . .	22
2.5	Räumliche Logiken . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Formalisierungsprozess</b>	<b>31</b>
3.1	Erkennen von Kritikalitätsphänomenen . . . . .	32
3.2	Formulieren von Kritikalitätsphänomenen . . . . .	35
3.3	Formalisieren von Kritikalitätsphänomenen . . . . .	38
3.4	Analyse von Kritikalitätsphänomenen . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Exemplarische Umsetzung des Formalisierungsprozesses</b>	<b>57</b>
4.1	Kritikalitätsphänomendatenbank des DLR . . . . .	57
4.2	Untersuchung von Begriffen in formulierten Kritikalitätsphänomenen . . . . .	58
4.3	Exemplarische Formalisierung einiger Kritikalitätsphänomene . . . . .	59
4.4	Exemplarische Umsetzung der Analyse . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>73</b>
5.1	Ergebnisse . . . . .	73
5.2	Werkzeuge . . . . .	74
5.3	Allens Temporal Logic . . . . .	74
5.4	Ausstehende Arbeiten . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>77</b>
	<b>Appendices</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>87</b>



## Abbildungsverzeichnis

2.1	Hierarchie der OWL Versionen [Gra+08]. Grafik nach „Semantic Web Technologien“ (Dr. Harald Sack, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam) . . . . .	20
2.2	Kompositionstabelle der zeitlichen Relationen nach Allen [Kna99]. . . . .	24
2.3	Verbindungen im Region Connection Calculus 8. [LY03] . . . . .	29
2.4	Aufbau der räumlichen Verbindungen im Double Cross Calculus [SN01]. . . . .	30
3.1	Vorläufiger Entwurf des Prozesses zur Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen. . . . .	31
3.2	Ableitungsbaum eines Wortes der Grammatik $G_{KP}$ . . . . .	37
3.3	Hierarchie der in dieser Arbeit verwendeten Logiken. . . . .	38
3.4	Beispielhafte Intervallsequenz ohne Parallelität . . . . .	41
3.5	Beispielhafte Intervallsequenz mit Parallelität . . . . .	41
4.1	Darstellung von Kritikalitätsphänomenen als Knoten und ihrer Relationen als Kanten einer Graphstruktur in Neo4j. . . . .	57
4.2	Aufteilung der Worte aus Tabelle A.1 nach Wortarten . . . . .	58
4.3	Minimale Ontologie für die exemplarische Umsetzung der Analyse. Nach OWL beschreibt Thing das universell erfüllte Konzept. Linien geben Hierarchien an, Pfeile Relationen, eckige Kästen Klassen und ovale Strukturen Namen der Relationen. . . . .	62
4.4	Mögliche Abstraktionen zwischen vier Kritikalitätsphänomene vor der Analyse. . . . .	64
4.5	Auswertung der Abstraktionsrelationen zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen nach der Analyse . . . . .	71
4.6	Abstraktionshierarchie zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen . . . . .	71



---

## Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der dreizehn Allenschen Zeitrelationen mit ihren Symbolen sowie Buchstaben, die z. T. anstelle der Symbole verwendet werden. Nach: [All84] . . . . .	23
3.1	Aufschlüsselung der Kompetenzfragen (Tabelle aus [Wes+22]). . . . .	46
4.1	Kombinatorische Entitätspaare für die exemplarische Analyse vierer Kritikalitätsphänomene . . . . .	64
4.2	Gültige Entitätspaare für die exemplarische Analyse vierer Kritikalitätsphänomene nach der Überprüfung mit Pellet . . . . .	65
4.3	Gültige injektive Abbildungen der Entitäten des ersten Kritikalitätsphänomens auf die Entitäten des zweiten Kritikalitätsphänomens für die exemplarische Analyse vierer Kritikalitätsphänomene nach der Überprüfung mit Pellet . . . . .	65
4.4	Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP1 und KP2 . . . . .	67
4.5	Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP1 und KP3 . . . . .	67
4.6	Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP1 und KP4 . . . . .	68
4.7	Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP2 und KP3 . . . . .	68
4.8	Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP2 und KP4 . . . . .	68
4.9	Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP3 und KP4 . . . . .	68
4.10	Geltende Abstraktionsbeziehungen zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen der exemplarischen Analyse . . . . .	70
A.1	Tabelle aller in Kritikalitätsphänomenen der Datenbank enthaltener Wörter . . . . .	87

---



# 1 Einleitung

Mit der voranschreitenden Entwicklung im Bereich des automatisierten Fahrens gewinnt auch die Validierung der dort eingesetzten Systeme an Bedeutung. Die Validierung eines solchen Systems ist unter anderem aufgrund neuartiger Technologien wie neuronaler Netze oder statistischer Algorithmen erschwert.

Mit dem Begriff „Validierung“ ist hier die Definition nach Grady gemeint, welcher die Validierung als einen Prozess zur Demonstration des Verständnisses von einer oder mehrerer Anforderungen und der Erfüllbarkeit dieser durch ein Design aktueller Technologien bezeichnet [Gra97].

Grady grenzt die Validierung damit von der Verifikation ab, welche er als Nachweisverfahren bezeichnet, das eindeutig angibt, ob ein System die vorausgesetzten Anforderungen erfüllt oder nicht [Gra97].

Das Testen von Systemteilen ist für beide Verfahren ein elementarer Bestandteil. Bei der Validierung wird dabei überprüft, ob das System die gewünschten Anforderungen erfüllt, während bei der Verifikation klar gezeigt werden muss, dass kein unerwünschtes Verhalten auftritt, wenn z. B. Randfälle betrachtet werden.

Statistisches Testen der Systeme im späteren Einsatzgebiet ist nicht effizient umsetzbar [KW16]. Zudem ergibt sich durch das Fahren von ungetesteten automatisierten Fahrzeugen ein Risiko. Auftretende Fehler könnten in einem solchen Testaufbau zu Schäden an Infrastruktur, Fremdeigentum und sogar Wohlbefinden von Lebewesen führen.

Der Begriff des statistischen Testens bezeichnet dabei eine Methode, die für die Evaluierung einer statistischen Hypothese der Sicherheit (z. B. maximal ein Unfall in 1 Million Fahrten) herangezogen wird [LRC05]. Es kann aber auch sogenanntes Signifikanz-Testen mit diesem Begriff bezeichnet werden. Diese beiden Begriffe werden häufig äquivalent verwendet, obwohl es Arbeiten gibt (z. B. von Kempthorne im Bereich der Statistik [Kem76] oder von Lawlis und Peek im Bereich der Psychologie [LP79]), die Unterschiede zwischen den Beiden aufzeigen [Hub87]. Signifikanztests fallen unter verschiedenste Kategorien, wobei die bekannteste Kategorie durch die sogenannten modellbasierten Tests gebildet wird. Diese argumentieren über die Verteilung von Messwerten und ihrer Fehler [Hul93].

Der Umfang eines solchen Tests wurde von Kalra et al. für den Bereich des autonomen Fahrens berechnet. Dazu wurde zunächst die Fehlerrate eines menschlichen Fahrers herangezogen und anschließend eine Hypothese gewählt, bei der die Fehlerrate des Fahrzeugs geringer als die des menschlichen Fahrers ist.

Um diese Hypothese zu beweisen, benötige man nach Kalra et al. ca 8 Milliarden gefahrene Kilometer (original: 5 Milliarden Meilen). Zur weiteren Berechnung wurde eine Flotte von 100 Fahrzeugen angenommen, die 24 Stunden am Tag und 365 Tage im Jahr fährt. Etwaige Zeiten zum Laden oder Tanken wurden nicht berücksichtigt. Fahrzeuge in dieser Berechnung fahren ca 40 km/h (original: 25 mph). Mit diesen Annahmen ergibt sich eine Testzeit von ca. 225 Jahren. Dieses Ergebnis stützt die bereits erwähnte Annahme von Koopman und Wagner [KW16], dass statistisches Testen nicht effizient umsetzbar ist.

Dies liegt auch an der Problematik des offenen Kontextes, die in der Arbeit von Poddey et al. eingeführt und in Abschnitt 2.2 genauer erläutert wird [Pod+19]. Dieser besagt, dass Einflussfaktoren

und Wertebereiche einer Situation nicht absehbar sind. Dies verursacht das Fehlen von Informationen bezüglich dessen, was zu beobachten ist.

Ein Fahrzeug könnte etliche Betriebsstunden absolvieren, ohne in sicherheitsrelevante Situationen zu geraten. Solche Situationen sind jedoch für eine aussagekräftige Absicherungsargumentation nötig.

Eine Situation ist hierbei wie von Ulbrich et al. definiert, eine Momentaufnahme in Verbindung mit Intentionen der Beteiligten, während ein Szenario mindestens eine Situation beinhaltet und das zeitliche Voranschreiten berücksichtigt [Ulbr+15].

Außerdem ist zu beachten, dass die Verkehrsumgebung aus einer überabzählbaren Menge unterschiedlicher Situationen und Szenarien besteht. Durch den offenen Kontext kommt die Problematik hinzu, dass die Wertebereiche und Faktoren im Voraus nur unzureichend bekannt sind. Die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Situation mit identischen beobachtbaren Einflussfaktoren ist also entsprechend gering.

Daher ist es für einen effizienten Absicherungsprozess imperativ, diese im Straßenverkehr auftretenden Einflussfaktoren so zusammenzutragen, dass möglichst viel Sicherheitsrelevanz bezüglich der realen Welt abgedeckt werden kann, während die Handhabbarkeit durch geeignete Abstraktion erhalten bleibt. Ein Ansatz hierfür ist das Durchführen einer Kritikalitätsanalyse, welche diese Einflussfaktoren der Verkehrswelt identifiziert und auf einem adäquaten Abstraktionslevel in Form von Kritikalitätsphänomenen beschreibt [Neu+21].

Während eine Notation von Kritikalitätsphänomenen in natürlicher Sprache eine starke Abstraktion ermöglicht, für Experten einfacher formulierbar und vorteilhaft für das menschliche Verstehen ist, kann eine solche, nicht-formale Sprache nicht direkt maschinell verarbeitet werden. Somit sind Kritikalitätsphänomene in dieser Form weder in der Simulation noch in anderen Anwendungen nutzbar.

Betrachtet man nun, wie viele Tests für die Validierung eines solchen Systems notwendig sind, summiert sich der Aufwand einer manuellen Formalisierung für jede spezifische Implementierung (z. B. für einzelne Simulations- oder Verifikations-Programme) bis zu einem Punkt, an dem diese Vorgehensweise nicht mehr effizient durchführbar ist.

Zusätzlich bietet die Formalisierung von Anforderungen an ein System eindeutige Aussagen und formale Nachweisbarkeit der Eigenschaften und erlaubt Korrektheitsbeweise. Diese Vorteile sind auch im Bereich der eingebetteten Systeme bekannt [Edw+97].

Eine Formalisierung bietet außerdem die Möglichkeit spezielle Implementierungsdetails zu prüfen. Ist beispielsweise spezifiziert worden, dass das zu entwickelnde Fahrzeug keine Brücken befahren soll, kann in der Simulation mithilfe einer Formalisierung für Brücken spezifisch gewählt werden, dass Brücken in der zu testenden Situation auftreten sollen. Befährt das Fahrzeug diese ausreichend oft nicht, ist die Spezifikation dem implementierten Systems erfüllt.

Eine maschinelle Verarbeitung und somit eine Formalisierung der Kritikalitätsphänomene ist folglich notwendig. Eine passende und ausdrucksstarke Formalisierung vereinheitlicht überdies die Ausdrücke der Kritikalitätsphänomen-Beschreibungen, sodass es nicht zu Missverständnissen zwischen einzelnen Experten oder verschiedenen Teams im Bereich der Entwicklung (z. B. Anforderungserhebung und Implementierung) kommt. Gerade im Rahmen nicht formalisierter Sprache können verschiedene Personen mit einem Ausdruck unterschiedliche inhaltliche Begriffe und damit Einflussfak-

toren beschreiben, was zu einer Unschärfe des Verständnisses von Kritikalitätsphänomenen führen würde.

Durch eine nicht-eindeutige oder nicht konsistente terminologische Basis und ungenaue Formulierungen ist außerdem ohne Formalisierung nicht immer klar zu erkennen, ob es Relationen zwischen zwei ermittelten Kritikalitätsphänomenen gibt und, wenn solche vorhanden sind, welcher semantischen Art diese sind. Dies kann zum Beispiel daran liegen, dass die Formulierung für zwei Kritikalitätsphänomene verschieden gewählt wurde (vgl. Kritikalitätsphänomene „Ein Fußgänger hat Zugang zur Straße“ und „Ein Fußgänger befindet sich an der Straße“, die durchaus eine gleiche Situation beschreiben können) oder daran, dass zwei Experten mit verschiedenen Wortschätzen die Kritikalitätsphänomene ausarbeiten (z. B. „Ampel“ und „Lichtsignalanlage“).

Daher ist es notwendig, eine einheitliche terminologische Basis zu schaffen. Hierbei bietet es sich an, Kritikalitätsphänomene in natürlicher Sprache mittels sogenannter Ontologien zu formalisieren, die in Abschnitt 2.3.2 genauer betrachtet werden.

Solche Ontologien erlauben die Klärung von Missverständnissen durch feste Definitionen und stellen für den gesamten Entwicklungsprozess eindeutig und experten-unabhängig dar, welche beobachtbaren Einflussfaktoren mit dem entsprechenden Kritikalitätsphänomen gemeint sind. Zudem ermöglichen sie das Problem des offenen Kontext anzugehen, wenn eine passende Abstraktionsebene gewählt wird. Dies erfolgt durch Abstraktion der ermittelten Einflussfaktoren der Kritikalitätsphänomene in der Ontologie.

In dieser Arbeit wird ein Prozess entworfen, der die Analyse von sicherheitsrelevanten Kritikalitätsphänomenen im Straßenverkehr erlaubt. Der Fokus wird überdies auf Kritikalitätsphänomene mit zeitlichen Aspekten gelegt. Dazu wird in Kapitel 2 zunächst die Wissensbasis für diesen Prozess gelegt. Nachfolgend in Kapitel 3 wird der Prozess vorgestellt und in Beziehung zu verwandter Forschung gesetzt. In diesem Kapitel wird zudem auf die Formalisierung mithilfe von Ontologien eingegangen (siehe Abschnitt 3.4). Diese ermöglicht die maschinelle und automatisierte Durchführung einer Vielzahl von Analysen. Nach vollständiger Beschreibung des Prozesses folgt Kapitel 4. In diesem Kapitel erfolgt eine Angabe einer exemplarischen Formalisierung von sicherheitsrelevanten Kritikalitätsphänomenen mit zeitlichen Aspekten. Anschließend erfolgt in Kapitel 5 eine Evaluierung des Prozesses und der exemplarischen Formalisierung. Schließlich wird in Kapitel 6 ein Fazit gezogen.



## 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die für das Verständnis der Arbeit benötigten Grundlagen eingeführt. Dazu gehören neben den namensgebenden sicherheitsrelevanten Kritikalitätsphänomenen und ihren Beziehungen auch Grundlagen verschiedener Logikbereiche und innerhalb dieser mehreren Konzepte.

### 2.1 Kritikalitätsphänomene und ihre Relationen

**Definition 2.1.1** (Kritikalität [Neu+21]). Als Kritikalität (einer Verkehrssituation) wird das kombinierte Risiko aller in der Situation vorhandenen Verkehrsteilnehmer bezeichnet.

$$K = risk(V_1, \dots, V_n)$$

wobei  $V_1, \dots, V_n$  alle in der Situation vorhandenen Verkehrsteilnehmer sind.

Kritikalität ist zeitlich auf die Ausführung der Absichten der Verkehrsteilnehmer beschränkt [Neu+21].

**Definition 2.1.2** (Phänomen [Neu+21]). Ein Phänomen ist definiert als eine logische Aussage einer Menge von Einflussfaktoren, die bei Auftreten des Phänomens vorhanden sind.

**Definition 2.1.3** (Kritikalitätsphänomen [Neu+21]). Ein Kritikalitätsphänomen ist ein Phänomen (Definition 2.1.2), das mit erhöhter Kritikalität (Definition 2.1.1) assoziiert ist.

Diese Kritikalitätsphänomene werden durch Experten basierend auf Daten und (Vor-)Wissen zusammengetragen. So ist z. B. „Vereisung der Fahrbahn“ ein solches Kritikalitätsphänomen, das aufgrund der schlechter einschätzbaren Dynamik das Risiko eines Unfalls im Vergleich zu trockenen Straßenverhältnissen erhöht.

**Definition 2.1.4** (Szenarienmenge  $S(\cdot)$ ). Die Menge aller Szenarien, in denen ein Kritikalitätsphänomen  $A$  auftritt wird mit  $S(A)$  bezeichnet.

#### 2.1.1 Relationen zwischen Kritikalitätsphänomenen

Zwischen Kritikalitätsphänomenen gibt es zudem Relationen. In dieser Arbeit werden zwei Arten von Relationen betrachtet:

- Synergierelationen
- Abstraktionsrelationen

Der Fokus liegt im weiteren Teil der Arbeit auf den Abstraktionsrelationen.

## 2.1.2 Synergierelationen

Synergierelationen beschreiben Synergien zwischen zwei Kritikalitätsphänomenen. Dies kann eine erhöhte Kritikalität, eine erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit oder auch eine direkte Folge sein.

Synergien von Kritikalitätsphänomenen lassen sich aufgrund von Expertenwissen (vgl. z. B. die Auswirkung von Kurven in Verbindung mit einer vereisten Fahrbahn) oder mithilfe sogenannter „Wirkzusammenhänge“ erkennen. Weitere Informationen bezüglich dieser Relationen können in spezifischer Literatur sowie in Literatur über Kausalität gefunden werden (vgl. [Neu+21; HR10; Pea10; Pea09; Hol86])

### 2.1.2.1 Abstraktion und Konkretisierung

Ein Kritikalitätsphänomen wäre auch „Fahren auf einer 2m breiten, vereisten Fahrbahn um 21:57 Uhr, während ein blaues Auto, das vor dem Fahrzeug fährt, stark bremst“. Bei diesem Kritikalitätsphänomen ist die Assoziation zu Kritikalität jedoch nicht deutlich im Vergleich zu den abstrakteren Kritikalitätsphänomenen. Daher ist diese Konkretisierung eine Kombination aus einer stark erhöhten Partitionierung des Szenarienraums in Verbindung mit fehlendem Informationsgewinn und damit nicht als sinnvolle Abstraktionsebene geeignet. Dies ist durch die Gegebenheiten der Umwelt und unserer Sprache bedingt, die dazu führen, dass jedes Kritikalitätsphänomen mit annähernd beliebig vielen weiteren Details konkretisiert und kombiniert werden kann.

Durch diese Konkretisierungen und Kombinationen entstehen eine große Menge an formulierbaren Kritikalitätsphänomenen. Es ist daher wichtig, Kritikalitätsphänomene zu abstrahieren, um eine handhabbare und aussagekräftige Menge von Kritikalitätsphänomenen zu erhalten, während immer noch möglichst viele relevante Faktoren der Verkehrswelt abgedeckt werden.

**Definition 2.1.5** (Abstraktion [Neu+21]). Ein Kritikalitätsphänomen  $A$  wird als Abstraktion eines anderen Kritikalitätsphänomens  $B$  bezeichnet, wenn die Menge der Szenarien, in der das Kritikalitätsphänomen  $B$  auftritt, eine echte Teilmenge der Menge der Szenarien ist, in der das Kritikalitätsphänomen  $A$  auftritt.

$$B \sqsubseteq A \Leftrightarrow S(B) \subset S(A)$$

Eine Abstraktionsrelation liegt genau dann vor, wenn ein Kritikalitätsphänomen  $A$  eine Abstraktion eines anderen Kritikalitätsphänomens  $B$  ist, das dann wiederum eine Konkretisierung des Kritikalitätsphänomens  $A$  darstellt.

Diese Relationen ermöglichen eine Teilordnung auf der Menge der Kritikalitätsphänomene, sodass iterativ eine möglichst umfassende Sammlung erstellt werden kann, ohne alle möglichen Kombinationen zusammentragen zu müssen. Eine geeignete Abstraktionsmenge wächst stetig und ist somit nicht endgültig zusammen fassbar [Neu+21]. Eine iterative Konvergenz ist somit nur mit abstrakteren Kritikalitätsphänomenen zu erreichen. Da jedoch bei Abstraktion auch Aussagekraft verloren geht, ist ein Ansatz mit geeigneter Abstraktionsebene für Aussagekraft in Verbindung mit einer übergeordneten Ebene für eine vollständigere Abdeckung vorteilhaft.

### Eigenschaften der Abstraktionsrelation

Die Abstraktionsrelation bildet eine Halbordnung auf einer Menge von Kritikalitätsphänomenen. Ihr sind daher die folgenden Eigenschaften zuzuordnen [SD08]:

- Reflexivität
- Antisymmetrisch
- Transitivität

## 2.2 Die Problematik des offenen Kontexts

Nach Poddey et al. ist eine unstrukturierte Betriebsumgebung in der realen Welt (*unstructured real-world operational design domain*), und somit auch die Verkehrswelt, ein offener Kontext. Dieses Konzept beschreiben sie als eine Systemumgebung mit unendlich vielen Merkmalen und möglichen Wechselwirkungen, die nicht vollständig formal ausgedrückt werden können. Poddey et al. bezeichnen dies als „ $\infty$ -Komplexität“. Zum Konzept des offenen Kontexts gehört zudem eine evolutionäre Eigenschaft. Dies bedeutet, dass die Umgebung sich (auch nach Veröffentlichung des Systems) stetig verändert. Diese Veränderungen können laut Poddey et al. zu unerwünschtem Verhalten des Systems führen [Pod+19].

## 2.3 Beschreibungslogiken und Ontologien

Im folgenden werden Beschreibungsgrundlagen und die auf ihnen basierenden Ontologien beschrieben und ihre formalen Konzepte erläutert.

### 2.3.1 Beschreibungslogiken

Beschreibungslogiken sind ein Bereich der Logiken, in dem es darum geht, einen Ausschnitt vollständig zu beschreiben.

Die Terminologie dieser Arbeit orientiert sich im Bereich der Beschreibungslogiken und Ontologien an Baaders „The Description Logic Handbook“ (dt.: Das Beschreibungslogik Handbuch) [Baa+03]. Die Basis für Beschreibungslogiken bilden demnach sogenannte „atomare Konzepte“, die mit den Buchstaben  $A$  und  $B$  bezeichnet werden, und „atomare Regeln“, denen der Buchstabe  $R$  zugeordnet ist. Sie bieten elementare Beschreibungen und können für komplexere Zusammenhänge mithilfe sogenannter „Konzept Konstruktoren“, die den Unterschied zwischen verschiedenen Beschreibungslogiken ausmachen. Der Buchstabe  $C$  wird für „Konzept Beschreibungen“ genutzt.

Eine solche Beschreibungslogik ist die von Schmidt-Schauß und Smolka [SS91] präsentierte „attributive language“ (dt.: Attributivsprache), die die minimale Beschreibungslogiksprache mit praktischer Relevanz darstellt. Sie wird auch als  $\mathcal{AL}$ -Sprache bezeichnet.

**Definition 2.3.1** (Alphabet der  $\mathcal{AL}$ -Sprache [Baa+03]). Für das Alphabet der  $\mathcal{AL}$ -Sprache sind folgende Bezeichner definiert:

- $R \rightarrow \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ : Relationsbezeichner
- $A \rightarrow \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ : atomare Konzeptbezeichner
- $\top$  &  $\perp$ : spezielle Konzeptbezeichner

**Definition 2.3.2** (Grammatik der  $\mathcal{AL}$ -Sprache [Baa+03]). Die Grammatik der  $\mathcal{AL}$ -Sprache beinhaltet die folgenden Regeln:

$C \rightarrow A$	(Atomares Konzept)
$\top$	(Universelles Konzept)
$\perp$	(Falsum Konzept)
$\neg A$	(Atomare Negation)
$C \sqcap C$	(Schnitt)
$\forall R.C$	(Wertbegrenzung)
$\exists R.\top$	(begrenzte existentielle Quantifizierung)

Aus dieser Definition lassen sich sogenannte Role Inclusion Axioms (deutsch: Rolleninklusionsaxiome) bilden.

Auch lassen sich komplexere Zusammenhänge darstellen. Diese können über verschiedene Ebenen hierarchisch angeordnet sein. So ist beispielsweise ein LKW ein Fahrzeug, ein Fahrzeug wiederum ist ein räumliches Objekt. Daraus lässt sich innerhalb der Beschreibungslogik ableiten, dass auch ein LKW ein räumliches Objekt ist.

### 2.3.2 Ontologien

**Definition 2.3.3** (Ontologie). Eine Ontologie ist ein Formalismus, welcher es ermöglicht, formale Beschreibungen der Konzepte, die hinter einem gewissen Begriff stehen, und ihre Verbindungen zueinander darzustellen [Gru09]. In der Informatik werden Ontologien als Informations- und Wissenssysteme betrachtet und als Kombination von A-Box und T-Box dargestellt.

Im Folgenden sind T-Box und A-Box definiert. Beide sind wie in der voran gegangenen Definition aufgeführt, elementare Teile einer Ontologie. Um den Begriff einer T-Box definieren zu können, muss zunächst der Begriff einer Definition im Kontext von Ontologien geklärt werden.

**Definition 2.3.4** (Definition [Baa+03]). Eine Definition eines Konzeptes gibt an, welche Eigenschaften und Konzepte ein Individuum erfüllen muss, um diesem Konzept zugeordnet zu werden.

**Definition 2.3.5** (T-Box [Baa+03]). Eine Terminologie (oder T-Box)  $T$  bezeichnet eine endliche Menge von Definitionen (vgl. Definition 2.3.4) für die gilt, dass für jedes atomare Konzept  $A$  innerhalb von  $T$  maximal ein Axiom innerhalb von  $T$  existiert, dessen linke Seite  $A$  ist.

Dabei enthält die T-Box eine Terminologie, die intensionales Wissen darlegt. Diese Terminologie baut sich durch Deklarationen auf. Diese Deklarationen beschreiben die allgemeinen Eigenschaften von Konzepten. Daraus ergibt sich eine unterordnende Beziehung zwischen den einzelnen Bestandteilen, die eine Darstellung von T-Boxen als gitterartige Struktur nahelegen [Baa+03].

#### Beispiel

Eine T-Box enthält beispielsweise folgende Konzepte:

- $\text{MotorisiertesFahrzeug} := \text{Fahrzeug} \sqcap \exists \text{motorisiertDurch}. \top$
- $\text{Fahrzeug} := \exists \text{hatRaeder}. \top$

**Definition 2.3.6** (A-Box [Baa+03]). Eine A-Box enthält sogenannte Zugehörigkeitsaussagen von Individuen. Diese setzen die Konzepte der Beschreibungslogik in Beziehung zu konkreten Individuen. Damit enthält eine A-Box erweitertes Wissen über die Domäne von Interesse.

Eine A-Box hingegen enthält „Zugehörigkeitsaussagen“, die das Wissen der Konzepte auf die Ebene der Individuen anwendet. Zugehörigkeitsaussagen sind somit Fakten einzelner Individuen, die mit den terminologischen Konzepten der T-Box assoziiert sind [Baa+03].

## Beispiel

Beispiele für Aussagen innerhalb der A-Box sind:

- dass eine konkrete Entität zur Klasse Auto gehört (z. B. Fahrzeug(meinErstesAuto)) oder
- dass die Ampel an der linken Seite der dritten Kreuzung der Ofener Straße gerade rot ist.

Ist eine Abstraktionsebene festgelegt worden, lassen sich optimalerweise alle Faktoren in Klassen der Ontologie einordnen.

### 2.3.2.1 OWL

Eine Form, Ontologien in maschinenlesbarer Form zu notieren, ist die Web Ontology Language (kurz: OWL) 2. Sie wurde entwickelt, nachdem Ontologien im RDF Schema nicht mehr genug Aussagekraft hatten, um die gewünschten Zusammenhänge darzustellen [HPV03]. Dazu wurde vom World Wide Web Consortium (kurz: W3C) eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen. Diese entwickelte OWL und die W3C gab 2004 eine Empfehlung für diese Sprache heraus. OWL ist in mehreren Versionen verfügbar. Die Hierarchie dieser Versionen ist in Abbildung 2.1 abgebildet.

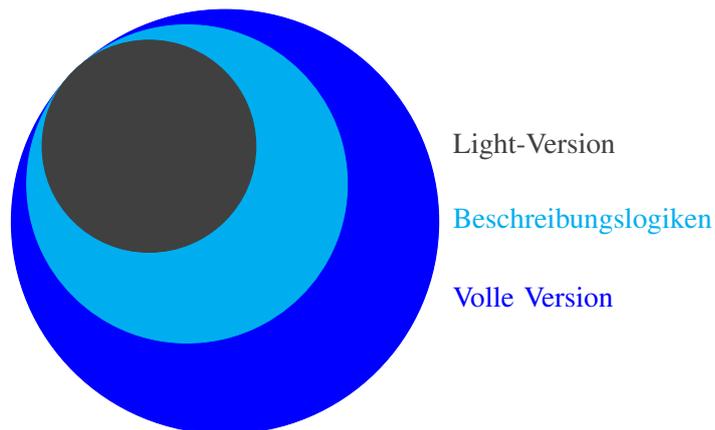


Abbildung 2.1: Hierarchie der OWL Versionen [Gra+08]. Grafik nach „Semantic Web Technologien“ (Dr. Harald Sack, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam)

Von OWL Light bis zur vollen Version gibt es eine Zunahme von Aussagekraft [Gra+08] in Verbindung mit einer Abnahme der möglichen (und entscheidbaren) Analyseverfahren [Gra+08]. Auch wenn in der ersten Version OWL 1 bereits viele Funktionen und eingebettete Inferenzwerkzeuge wie RACER [HM01] enthält, gibt es jedoch auch Probleme wie zum Beispiel fehlerhafte Syntaxanalyse der eigenen Syntax [Gra+08].

Diese wurden mit der Veröffentlichung von OWL 2 angegangen. OWL 2 wurde in gleicher Weise wie OWL 1 aufgeteilt. Ihre Hierarchie ist demnach ebenfalls in Abbildung 2.1 aufgezeigt.

### 2.3.2.2 Protégé

Protégé ist eine Entwicklungsumgebung für OWL 2, die viele Besonderheiten beinhaltet. Sie bietet beispielsweise die Möglichkeit, beschreibungslogische Inferenzwerkzeuge wie HermiT und Pellet direkt in der Anwendung zu nutzen, da Protégé eine direkte Speicherverbindung beinhaltet.

Diese Inferenzwerkzeuge erlauben die Analyse der in Protégé erstellten Ontologien. So kann beispielsweise die Konsistenz der Ontologie überprüft werden. Auch erlaubt das Verwenden dieser Werkzeuge spezifische Anfragen an die Ontologie, wie beispielsweise die Abfrage von Subklassen einer Teilmenge von Klassen. Eine Verwendung von Pellet in Verbindung mit Protégé ist in dieser Arbeit in Abschnitt 4.4 zu finden.

Protégé wurde als Umgebung für die Entwicklung wissensbasierter Systeme entwickelt und wird seit der Veröffentlichung 1983 stetig verbessert. Es wurde ursprünglich erdacht, um einen Engpass in der Wissensgewinnung zu verringern. Die erste Version von Protégé entsprach einer Anwendung, die strukturiertes Wissen bereithielt, um den Prozess der Wissensaquisition zu vereinfachen[Gen+03].

Seit der Veröffentlichung bis 2015 hat sich Protégé zur meist verwendeten Plattform zur Erstellung von Ontologien entwickelt [Mus15]. Protégé ist als lokales Programm und als Web-Applikation, die den Namen Protégé-Web trägt, verfügbar. Beide Möglichkeiten haben Vor- und Nachteile. Während das lokale Programm keine Internetverbindung benötigt, erlaubt die Webversion ein einfaches Teilen der erarbeiteten Ontologien mit weiteren Personen, die auch miteinander arbeiten können, ohne eine externe Versionierung anlegen zu müssen. Protégé-Web ist auch lokal nutzbar, sodass im eigenen Netzwerk ohne Zugriff Außenstehender gearbeitet werden kann.

Protégé-Web enthält jedoch keine der, in der Desktop-Version verfügbaren, Inferenzwerkzeuge.

## 2.4 Zeitliche Logiken

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zeitlicher Logiken erläutert und die für den Entwurf des Prozesses benötigte zeitliche Logik vorgestellt.

### 2.4.1 Verwendung von zeitlichen Logiken

Zeitliche Logiken werden eingesetzt, um zeitliche Aspekte in logischen Ausdrücken darstellen zu können. Zu den bekanntesten dieser Logiken zählen dabei die *linear temporal logic* (kurz: LTL) [Pnu77] und der *duration calculus* (kurz: DC) [CHR91]. Sie werden verwendet, um Abfolgen von Zeiten und an Zeiten geknüpfter Eigenschaften logisch darzustellen.

### 2.4.2 Allen Temporal Logic

Die *Allen temporal logic* (kurz: ATL) ist eine von James F. Allen entwickelte und in [All84] angewandte, zeitliche Logik. Sie unterscheidet sich unter anderem von LTL und DC, indem sie parallele zeitliche Vorgänge erlaubt. Sie basiert auf dem Allen'schen Kalkül und wurde bereits vor der Anwendung von James F. Allen in einer Veröffentlichung von 1981 publiziert [All81]. 1984 wurde sie anschließend ebenfalls von James F. Allen für die Anwendung innerhalb der künstlichen Intelligenz erweitert [All84].

#### 2.4.2.1 Herkunft

ATL wurde entwickelt, um die von Allen erdachten Konzepte von Aktionen zu beschreiben. Mit diesen sollte die unzulängliche Aussagekraft in den Bereichen der natürlichen Sprachverarbeitung und Problemlösung innerhalb der künstlichen Intelligenz angegangen werden.

In diesen fehlten bis zu diesem Zeitpunkt die Möglichkeiten, Aktionen ohne Aktivität, Aktionen ohne klare Unterteilung in Sub-Aktionen und simultane, miteinander interagierende Aktionen darzustellen. Daher gab es Allens Meinung nach keine berechenbare Theorie, die in der englischen Sprache ausdrückbare Aktionen ausreichend darstellen konnte.

#### 2.4.2.2 Zeitliche Basis von ATL

ATL basiert wie auch der Duration Calculus auf Zeitintervallen anstelle von Zeitpunkten wie in LTL. Allen begründet dies dadurch, dass es zwei verschiedene identifizierbare Zeiten gibt: Die Zeiten von Ereignissen und die Zeiten, in denen Eigenschaften gelten.

Ersteres wäre beispielsweise die Zeit, in der ein Auto eine Kreuzung befährt, während zweiteres die Zeit beschreibt, in der ein Auto eine Geschwindigkeit von über 100km/h hält.

Während das Gelten von Eigenschaften immer für ein Zeitintervall definiert ist, ist vorstellbar, dass ein Ereignis nur zu einem Zeitpunkt eintritt. Hier könnte man beispielsweise das Öffnen einer Autotür anführen. Allen sagt über solche Ereignisse, dass es auch für solche Ereignisse immer ein Subintervall gibt, solange danach gesucht und das nötige Interesse dafür aufgebracht wird.

Zeitpunkte sind laut Allen nicht nötig und zudem mit der Semantik von ATL nur schwer vereinbar, da dann mit offenen und geschlossenen Intervallen gearbeitet werden muss[All84].

### 2.4.2.3 Semantik von ATL

Bei ATL handelt es sich um ein typisiertes Kalkül in der Prädikatenlogik erster Ordnung für den Allen drei verschiedene Ausdruck-Typen definiert:

- Ausdrücke des Typs „Zeitintervall“
- Ausdrücke des Typs „Eigenschaft“
- Ausdrücke, die Objekten entsprechen

Dabei definiert Allen den letzten Typ von Ausdrücken für seine Ereignis-basierten Ausdrücke innerhalb der „*Logic of Action*“. Mit diesen können in auftretenden Ereignissen Objekte (wie zum Beispiel ein Ball) referenziert werden. Diese Art von Ausdruck wird in dieser Arbeit nicht benötigt und daher nicht näher definiert (für weitere Informationen siehe [All84]).

Die übrigen Ausdrücke können in sieben verschiedene Prädikate eingebettet werden, die die zeitlichen Relationen zwischen ihnen darstellen. Außerdem wurde in der erweiterten Form von ATL aus [All84] ein Prädikat (Holds) hinzugefügt, das die Beziehung zwischen einer Eigenschaft und einem Zeitintervall angibt.

- $\text{Holds}(p, t)$
- $\text{Before}(t_1, t_2)$
- $\text{During}(t_1, t_2)$
- $\text{Overlap}(t_1, t_2)$
- $\text{Starts}(t_1, t_2)$
- $\text{Meets}(t_1, t_2)$
- $\text{Finishes}(t_1, t_2)$
- $\text{Equal}(t_1, t_2)$

Diese Prädikate ermöglichen die formale Notation der von Allen zusammengetragenen dreizehn Zeitrelationen, die in Tabelle 2.1 dargestellt sind.

*Tabelle 2.1: Übersicht der dreizehn Allenschen Zeitrelationen mit ihren Symbolen sowie Buchstaben, die z. T. anstelle der Symbole verwendet werden. Nach: [All84]*

Relation	Symbol	Symbol der Inversen
X before Y	< (B)	> (BI)
X equal Y	= (E)	= (E)
X meets Y	m (M)	mi (MI)
X overlaps Y	o (O)	oi (OI)
X during Y	d (D)	di (DI)
X starts Y	s (S)	si (SI)
X finishes Y	f (F)	fi (FI)

In Abhängigkeit von der Relation, in der die Zeitintervalle A und B und B und C zueinander stehen, lassen sich mögliche Relationen zwischen A und C ableiten. Diese Kompositionen sind in Abbildung 2.2 als Kompositionstabelle dargestellt.

	<	m	o	fi	di	si	s	d	f	oi	mi	>
<	<	<	<	<	<	<	<	<, m, o, s, d	<, m, o, s, d,	<, m, o, s, d,	<, m, o, s, d,	<, ..., >
m	<	<	<	<	<	m	m	o, s, d	o, s, d	o, s, d	fi, =, f	di, si, oi, mi, >
o	<	<	<, m, o	<, m, o	<, m, o, fi, di	o, fi, di	o	o, s, d	o, s, d	o, fi, di, si, =, s, d, f, oi	di, si, oi	di, si, oi, mi, >
fi	<	m	o	fi	di	di	o	o, s, d	fi, =, f	di, si, oi	di, si, oi	di, si, oi, mi, >
di	<, m, o, fi, di	o, fi, di	o, fi, di	di	di	di	o, fi, di	o, fi, di, si, =, s, d, f, oi	di, si, oi	di, si, oi	di, si, oi	di, si, oi, mi, >
si	<, m, o, fi, di	o, fi, di	o, fi, di	di	di	si	si, =, s	d, f, oi	oi	oi	mi	>
s	<	<	<, m, o	<, m, o	<, m, o, fi, di	si, =, s	s	d	d	d, f, oi	mi	>
d	<	<	<, m, o, s, d	<, m, o, s, d	<, ..., >	d, f, oi, mi, >	d	d	d	d, f, oi, mi, >	>	>
f	<	m	o, s, d	fi, =, f	di, si, oi, mi, >	oi, mi, >	d	d	f	oi, mi, >	>	>
oi	<, m, o, fi, di,	o, fi, di	o, fi, di, si, =, s, d, f, oi	di, si, oi,	di, si, oi, mi, >	oi, mi, >	d, f, oi	d, f, oi	oi	oi, mi, >	>	>
mi	<, m, o, fi, di	si, =, s	d, f, oi	mi	>	>	d, f, oi	d, f, oi	mi	>	>	>
>	<, ..., > <sup>†</sup>	d, f, oi, mi, >	d, f, oi, mi, >	>	>	>	d, f, oi, mi, >	d, f, oi, mi, >	>	>	>	>

†All 13 relations are possible.

Abbildung 2.2: Kompositionstabelle der zeitlichen Relationen nach Allen [Kna99].

Aus diesen Relationen und ihren Verbindungen ergeben sich zudem Axiome für die Semantik von ATL. Beispiele hierfür sind Gleichung 2.1 und Gleichung 2.2.

$$\text{Before}(t_1, t_2) \wedge \text{Before}(t_2, t_3) \implies \text{Before}(t_1, t_3) \quad (2.1)$$

$$\text{Meets}(t_1, t_2) \wedge \text{During}(t_2, t_3) \implies \text{Overlaps}(t_1, t_3) \vee \text{During}(t_1, t_3) \vee \text{Meets}(t_1, t_3) \quad (2.2)$$

Für den einfacheren Umgang wurde von Allen in [All84] zudem ein weiteres Prädikat von den bereits definierten Prädikaten abgeleitet. Diese Ableitung für das Prädikat  $\text{In}(t_1, t_2)$  ist in Gleichung 2.3 gezeigt.  $\text{In}$  gibt an, dass ein Intervall völlig innerhalb des zweiten Intervalls liegt und vereinigt daher die Möglichkeiten von  $\text{During}$ ,  $\text{Starts}$  und  $\text{Finishes}$ . Damit ist diese Oder-Verknüpfung in kürzerer Schreibform definiert.

$$\text{In}(t_1, t_2) \iff \text{During}(t_1, t_2) \vee \text{Starts}(t_1, t_2) \vee \text{Finishes}(t_1, t_2) \quad (2.3)$$

Für das hinzugefügte Prädikat  $\text{Holds}$  wurde zudem noch das Verhalten mit Sub-Intervallen definiert. Diese Formel ist in Gleichung 2.4 dargestellt. Gleichung 2.4 ist eine schwächere Variante, die jedoch für diese Arbeit ausreicht. Die stärkere Variante und die Ableitung der hier gezeigten Variante aus dieser sind in [All84] zu finden.

$$\text{Holds}(p, T) \iff (\forall t. \text{In}(t, T) \implies \text{Holds}(p, t)) \quad (2.4)$$

In Gleichung 2.4 bezeichnet  $T$  das übergeordnete Intervall und  $t$  ein Subintervall.

#### 2.4.2.4 Aufbau einer zeitlichen Abfolge in ATL

Die beschriebenen Konzepte aus ATL werden genutzt, um komplexere zeitliche Abläufe darstellen zu können. Dabei können die Operatoren beliebig miteinander kombiniert werden.

Ein Beispiel hierfür ist eine zeitliche Abfolge einer Autofahrt, bei der zunächst mit 100 km/h gefahren wird. Anschließend wird abgebremst und dann abgebogen, bevor abschließend wieder auf 100 km/h beschleunigt wird. Die Bedingungen der Geschwindigkeit und Richtungsänderung werden in den folgenden Formeln informell angegeben, da sie nicht in ATL spezifiziert werden.

Zunächst gibt es ein Intervall  $i_1$ , in dem mit einer Geschwindigkeit von  $v = 100\text{km/h}$  gefahren wird. Es gilt also:

$$\text{Holds}((v = 100\text{km/h}), i_1)$$

Diesem Intervall folgt ein zweites Intervall  $i_2$  in dem gebremst wird.

$$\text{Holds}((100\text{km/h}), i_1) \wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Holds}((20\text{km/h} < v < 100\text{km/h}), i_2)$$

Das dritte Intervall  $i_3$  beschreibt den Zeitraum, in dem mit einer zum Abbiegen geeigneten Geschwindigkeit (hier angenommen: 20 km/h) gefahren wird.

$$\begin{aligned} &\text{Holds}((100\text{km/h}), i_1) \wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Holds}((20\text{km/h} < v < 100\text{km/h}), i_2) \\ &\wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{Holds}((v = 20\text{km/h}), i_3) \end{aligned}$$

Das vierte Intervall  $i_4$ , in dem abgelenkt wird, verläuft parallel zum dritten Intervall  $i_3$ .

$$\begin{aligned} & \text{Holds}((100\text{km/h}), i_1) \wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Holds}((20\text{km/h} < v < 100\text{km/h}), i_2) \\ & \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{Holds}((v = 20\text{km/h}), i_3) \\ & \wedge \text{During}(i_3, i_4) \wedge \text{Holds}(\text{Abbiegen}, i_4) \end{aligned}$$

Abschließend wird nach dem Fahren mit geringer Geschwindigkeit wieder beschleunigt. Dies geschieht in Intervall  $i_5$ .

$$\begin{aligned} & \text{Holds}((100\text{km/h}), i_1) \wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Holds}((20\text{km/h} < v < 100\text{km/h}), i_2) \\ & \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{Holds}((v = 20\text{km/h}), i_3) \\ & \wedge \text{During}(i_3, i_4) \wedge \text{Holds}(\text{Abbiegen}, i_4) \\ & \wedge \text{Meets}(i_3, i_5) \wedge \text{Holds}((20\text{km/h} < v < 100\text{km/h}), i_5) \end{aligned}$$

Auf diese Art lassen sich beliebig komplexe Zusammenhänge zu Allen'schen Aussagenmengen verbinden. Über diese Aussagenmengen arbeitet das Kalkül, ermittelt Konsistenz und leitet weitere geltende Aussagen her.

#### 2.4.2.5 Eigenschaften von ATL

Das Allen'sche Kalkül ist weder herleitungs- noch widerspruchs-vollständig. Das bedeutet, dass z. T. Widersprüche nicht erkannt werden oder zu viele Möglichkeiten hergeleitet werden, obwohl klarere Einschränkungen möglich wären. Das Kalkül ist aber korrekt [SS13].

Ladkin und Maddux haben für das Allen'sche Kalkül ein Theorem entwickelt, das die Vollständigkeit von ATL zeigt. Sie konnten darüber hinaus zeigen, dass es eine einzige Struktur gibt, die das Kalkül abzählbar modelliert, es jedoch von keiner endlichen Struktur modelliert werden kann [LM87]. Ladkin schließt in seiner Promotion zudem, dass eine Theorie erster Ordnung des Kalküls entscheidbar ist [Lad87]. Vilain et al. haben zudem bewiesen, dass die Allen'sche Intervall Algebra NP-vollständig ist [VKV90].

## 2.5 Räumliche Logiken

Dieses Kapitel stellt die Grundlagen von räumlichen Logiken vor. Außerdem werden die für diese Arbeit benötigten räumlichen Logiken *RCC8* und *DCC* eingehend vorgestellt und beschrieben.

### 2.5.1 Grundlagen räumlicher Logiken

Räumliche Logiken sind dazu entwickelt worden, räumliche Zusammenhänge formal darstellen zu können. Im Bereich der räumlichen Logiken wird zwischen den Logiken mit quantitativen Relationen und Logiken mit qualitativen Relationen unterschieden.

#### 2.5.1.1 Quantitative räumliche Relationen

Quantitative räumliche Relationen basieren auf genauen numerischen Werten (z. B. Punkt A ist von Punkt B genau 23,7 m entfernt, Linie C und Linie D stehen in einem  $13,5^\circ$  Winkel zueinander, ...). Diese Werte sind oft schwer nachzuvollziehen und des Weiteren oft nicht in der erforderlichen Genauigkeit verfügbar. Außerdem sind sie für Verwendungen im Bereich der T-Boxen (vgl. Definition 2.3.5) aufgrund der erforderlichen Genauigkeit der Instanzen nur schlecht einsetzbar.

#### 2.5.1.2 Qualitative räumliche Relationen

Im Gegensatz zu den quantitativen räumlichen Relationen basieren qualitative räumliche Relationen auf weniger präzisen Aussagen (z. B. Punkt A ist vor Punkt B, Linie C ist nördlich von Linie D, ...). Diese Relationen sind einfacher auszuwerten und verständlicher für menschliche Betrachter. Das macht sie simpler im Umgang. Die für qualitative räumliche Relationen benötigten Daten sind zudem nahezu immer vorhanden, da sie auch ohne genaue Messwerkzeuge oder Sensoren bestimmt werden können. Ihr Raum für gewisse Veränderung innerhalb der Instanzen erzeugt außerdem einen Vorteil bei der Verwendung in T-Boxen.

### 2.5.2 RCC8 - Region Connection Calculus

Der *Region Connection Calculus 8* (kurz:RCC8) ist ein qualitativer Ansatz zur formalen Beschreibung räumlicher Gegebenheiten, der in vielen Bereichen Anwendung findet (vgl. [Coh+97; GR02; Don08; Ren03]). Er basiert wie die meisten räumlichen Logiken auf einer zweidimensionalen Ansicht. Zusätzlich wird über räumliche Intervalle argumentiert. Für diese Ansicht sind in RCC8 acht mögliche Verbindungen von Regionen definiert. Durch Kombination dieser ist es jedoch auch möglich, mehr Verbindungen zu beschreiben. Die in RCC8 definierten Verbindungen sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

RCC8 wurde basierend auf der Theorie von Clark entwickelt. In dieser 1981 veröffentlichten Arbeit, beschrieb Clark eine logische Formulierung von verschiedenen verbundenen Regionen [Cla81]. Dies basierte wiederum auf der 1929 veröffentlichten Arbeit von Whitehead, in der dieser seine frühere Arbeit über Teilbeziehungen überarbeitete [Whi29]. Während er 1919 und 1920 eine erweiterte Abstraktionstheorie basierend auf der Relation „x erstreckt sich über y“ (Gegenteilige Aussage zu „x ist Teil von y“) beschrieb [Whi20; Whi11], basierte eine überarbeitete Version seiner Theorie 1929 auf der Relation „x ist erweitert mit y verbunden“ [Whi29]. Diese Theorien wurden im Laufe der

Zeit weiterhin überarbeitet (vgl. [Whi10]). Clark nutzte die 1929 veröffentlichte Version und schuf auf Grundlage dieser einen Kalkulus, den er selbst als nicht-interpretiert angibt. Für ein leichteres Verständnis verweist er jedoch auf eine Interpretation nach Whiteheads Arbeiten [Cla81].

In diesem Kalkulus werden bereits die acht verschiedenen Relationen, die innerhalb des RCC8 Anwendung finden, definiert [Cla81].

Randell et al. nutzen diese Definitionen als Grundlage für ihre Relationen [RCC92].

Dabei basieren alle acht Relationen auf der Aussage aus Definition 2.5.1

**Definition 2.5.1** (Verbundenheit von Regionen). Die Aussage  $C(x, y)$  (sprich:  $x$  ist verbunden mit  $y$ ) ist genau dann wahr, wenn mindestens ein Punkt zugleich in  $x$  und in  $y$  liegt.  $C(x, y)$  ist reflexiv und symmetrisch, sodass gilt:

$$\begin{aligned} \forall x C(x, x) \\ \forall x, y [C(x, y) \Rightarrow C(y, x)] \end{aligned}$$

Die in Abbildung 2.3 gezeigten Verbindungen

- DC: disconnected (deutsch:unverbunden)
- EC: externally connected (deutsch: extern verbunden)
- PO: partly overlapping (deutsch: teilweise überschneidend)
- TPP: tangential proper part (deutsch: tangentialer Eigenteil)
- TPPi: invers tangential proper part (deutsch: inverser tangentialer Eigenteil)
- NTPP: non-tangential proper part (deutsch: nicht-tangentialer Eigenteil)
- NTPPi: invers non-tangential proper part (deutsch: inverser nicht-tangentialer Eigenteil)
- EQ: equal (deutsch: äquivalent)

sind wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} DC(x, y) &\equiv_{def} \neg C(x, y) \\ P(x, y) &\equiv_{def} \forall z [C(z, x) \Rightarrow C(z, y)] \\ PP(x, y) &\equiv_{def} P(x, y) \wedge \neg P(y, x) \\ x = y &\equiv_{def} P(x, y) \wedge P(y, x) \\ O(x, y) &\equiv_{def} \exists z [P(z, x) \wedge P(z, y)] \\ PO(x, y) &\equiv_{def} O(x, y) \wedge \neg P(x, y) \wedge P(y, x) \\ EC(x, y) &\equiv_{def} C(x, y) \wedge \neg O(x, y) \\ TPP(x, y) &\equiv_{def} PP(x, y) \wedge \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)] \\ NTPP(x, y) &\equiv_{def} PP(x, y) \wedge \neg \exists z [EC(z, x) \wedge EC(z, y)] \end{aligned}$$

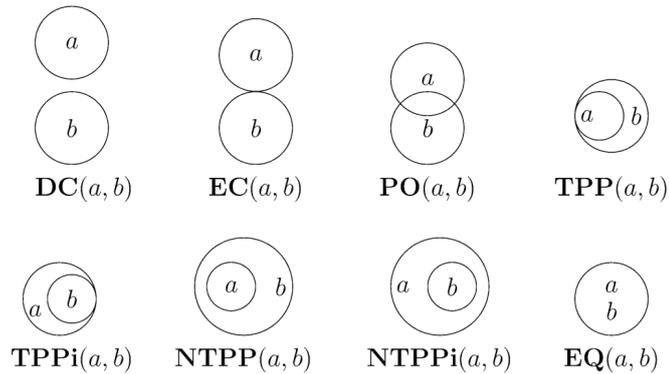


Abbildung 2.3: Verbindungen im Region Connection Calculus 8. [LY03]

Aus diesen ergibt sich dann für die inversen Relationen:

$$\begin{aligned} \text{TPPi}(x, y) &\equiv_{def} \neg \text{TPPi}(y, x) \\ \text{NTPPi}(x, y) &\equiv_{def} \neg \text{NTPPi}(y, x) \end{aligned}$$

Diese Relationen sind bezüglich ihrer Aussagekraft für diese Arbeit ausreichend. Es ist jedoch zu erwähnen, dass es auch Versionen des RCC gibt, in denen mehr Relationen definiert sind (vgl. [BLG98]).

### Eigenschaften von RCC8

Bodirsky und Wölfl haben gezeigt, dass Netzwerkkonsistenz Probleme mit RCC8 in polynomieller Zeit gelöst werden können. Voraussetzung hierfür ist, dass die Netzwerke bezüglich ihrer Baumbreite beschränkt sind [BW11]. Die Erfüllbarkeit von Formeln in RCC8 ist zudem entscheidbar [Ben94; WZ02].

### 2.5.3 DCC - Double Cross Calculus

Einen anderen Ansatz bietet der 1992 von C. Freska entwickelte *Double Cross Calculus* (kurz: DCC) [Fre92]. Dieser basiert auf dem räumlichen Zusammenhang zweier Punkte, die durch drei Linien in Form von zwei namensgebenden Kreuzen verbunden werden. Der Aufbau ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Ursprünglich ist der DCC für die Verwendung in Navigationssystemen entworfen worden. Es lassen sich jedoch auch generelle Aussagen über die Position von Punkten relativ zu zwei anderen Punkten im Raum treffen.

Dazu gibt es 15 verschiedene Prädikate (siehe Abbildung 2.4, die sich aus drei seitlichen

- l (left, deutsch: links)
- s (straight, deutsch: geradeaus)
- r (right, deutsch: rechts)

und fünf lateralen Positionen

- f (front, deutsch: vorne)
- p (perpendicular, deutsch: perpendicular)
- c (center, deutsch: mittig)
- l (line, deutsch: Linie)
- b (back, deutsch: hinten)

zusammensetzen, indem an einen Buchstaben zur Angabe der lateralen Position an einen Buchstaben zur Angabe der seitlichen Position angehängt wird. Es folgt die Angabe der betrachteten Punkte, sodass für drei Punkte  $a$ ,  $b$  und  $c$  eine Aussage der folgenden Form entsteht:

$$sf(a, b : c)$$

Dies kann wie folgt gelesen werden:

Von Punkt  $a$  in Richtung Punkt  $b$  blickend, befindet sich Punkt  $c$  geradeaus, vorne.

Bei den lateralen Bezeichnungen fällt auf, dass zwei der Bezeichner keine eindeutige Position benennen. Es handelt sich dabei um  $p$  und  $l$ , welche innerhalb des DCC beide eine Position auf einer perpendicularen Linie bezeichnen.  $p$  bezeichnet die Position auf der perpendicularen Linie, die durch den Punkt  $b$  (bzw. den Punkt der Blickrichtung) verläuft und  $l$  bezeichnet die Position auf der perpendicularen Linie, die durch den Punkt  $a$  (bzw. den ausgehenden Punkt) verläuft.

Mithilfe dieser Prädikate lässt sich, sofern zwei Referenzpunkte angegeben werden können, die Position jeder Entität innerhalb dieses Bereichs in die entsprechenden Regionen einordnen.

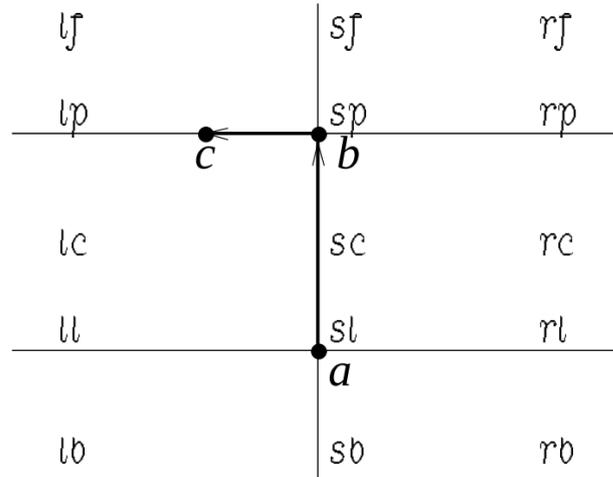


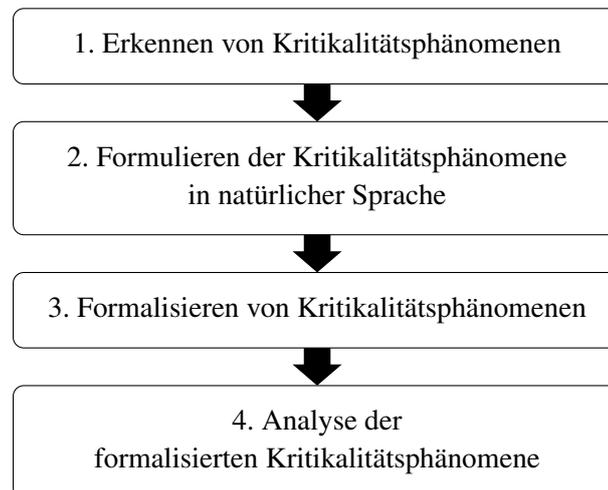
Abbildung 2.4: Aufbau der räumlichen Verbindungen im Double Cross Calculus [SN01].

### 2.5.3.1 Eigenschaften des DCC

Scivos und Nebel haben gezeigt, dass der DCC entscheidbar und das Schließen in der Sprache in PSPACE möglich ist [SN01]. Für Teilmengen des Kalküls ist es möglich, das Erfüllbarkeitsproblem in NP Komplexität zu lösen [SN01].

### 3 Formalisierungsprozess

Im Folgenden wird ein Entwurf eines Prozesses zur Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen beschrieben und erläutert, der bei der Erkennung von Kritikalitätsphänomenen beginnt und bis hin zur automatisierten Analyse der formalisierten Kritikalitätsphänomene reicht.



*Abbildung 3.1: Vorläufiger Entwurf des Prozesses zur Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen.*

Dieser Prozess setzt sich nach einem ersten Konzept zusammen aus 4 Schritten:

- dem (experten-basierten) Erkennen von Kritikalitätsphänomenen,
- dem Formulieren der Kritikalitätsphänomene in natürlicher Sprache,
- dem Formalisieren dieser Kritikalitätsphänomene,
- und der Analyse der formalisierten Kritikalitätsphänomene.

In dieser Arbeit wird der Fokus des vierten Schritts auf die Abstraktions- und Konkretisierungsrelationen gelegt, die in Unterunterabschnitt 2.1.2.1 beschrieben sind. Im allgemeinen Prozess sind jedoch auch andere Relationen wie z. B. Synergien oder Überprüfungen in Datensätzen denkbar.

### 3.1 Erkennen von Kritikalitätsphänomenen

Das Erkennen von Kritikalitätsphänomenen ist eine kognitive Tätigkeit, bei der noch kein Artefakt entsteht. Es gibt dabei verschiedene Möglichkeiten, diesen Schritt zu vollziehen. So können beispielsweise Unfalldaten gesichtet, Autofahrer gefragt oder Verkehrssituationen in Katalogen oder Videos analysiert werden. Ein erkanntes Kritikalitätsphänomen enthält hier meist eine sehr konkrete Menge von Einflussfaktoren, da alles Betrachtete ohne Abstraktion herangezogen wird. In diesem Kapitel wird das Erkennen von Kritikalitätsphänomenen in verschiedenen Quellen auf verschiedene Arten beschrieben.

#### 3.1.1 Erkennen von Kritikalitätsphänomenen in verwandten Arbeiten

Das Erkennen von Kritikalitätsphänomenen wird meist als gegeben angesehen. Neurohr et al. geben eine Extraktion eines Kritikalitätsphänomens als einen Prozess mit zwei möglichen Umsetzungen an: Wissensextraktion aus Daten oder aus Expertenwissen [Neu+21].

#### 3.1.2 Erkennen von Kritikalitätsphänomenen als wissensgenerierender Vorgang

Nach dem Erkennen von Kritikalitätsphänomenen gibt es typischerweise kein physisches oder digitales Artefakt. Da dieser Schritt jedoch grundlegend für die Formulierung und anschließend auch die Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen ist, muss es einen Mehrwert geben. Dieser liegt in der Generierung von Wissen über Situationen. Während der Betrachtung von Verkehrssituationen, dem Lesen der Straßenverkehrsordnung oder weiteren relevanten Vorgängen zum Erkennen von Kritikalitätsphänomenen, bekommen Experten einen Eindruck von der Kritikalität der Situation. Dabei ist noch nicht benannt, weshalb diese auftritt und was die maßgebliche Ursache (oder Ursachen) ist (sind). Dennoch wird die Situation als kritisch eingeschätzt. Im nächsten Schritt wird dann nach eingehender Betrachtung formuliert, warum die betrachtete Situation kritisch ist..

Betrachtet man den Schritt des Erkennens von Kritikalitätsphänomenen aus diesem Blickwinkel, so wäre es durchaus möglich, ihm ein Artefakt zuzuordnen: eine Menge mit Kritikalität assoziierter Situationen, Regeln der Straßenverkehrsordnung, o.ä., in denen das Kritikalitätsphänomen (die Kritikalitätsphänomene) noch nicht klar benannt wurden.

#### 3.1.3 Wissensbasierte Ansätze

Wissensbasierte Ansätze zur Erkennung von Kritikalitätsphänomenen basieren auf Expertenwissen. Hierzu kann das Wissen verschiedener Bereiche kombiniert werden.

Für diese Kombination müssen Experten der Bereiche sich zusammenfinden. So kann beispielsweise ein Fahrlehrer eine Übersicht über schwierig zu erfassende Verkehrssituationen und allgemein kritische Situationen beitragen, während ein Entwickler aus dem Bereich der Robotik Angaben zu Sensorproblemen oder Schwierigkeiten im Bereich des maschinellen Lernens machen kann.

Um dieses Expertenwissen zusammenzutragen gibt es verschiedene Ansätze:

- gemeinsames Brainstorming
- Serielles Hinzufügen

- mehrere Expertengruppen bilden

Jeder dieser Ansätze hat Vor- und Nachteile.

Während bei gemeinsamem Brainstorming gemeinsamer Input zu neuen Ansätzen führen kann, werden hier auch Ideen, die vom Großteil der Experten nicht nachvollzogen werden können, schneller verworfen.

Das serielle Hinzufügen bietet das genaue Gegenteil. Hier wird jede Idee der einzelnen Experten aufgenommen. Es kommt jedoch nicht zu gemeinsamen Ideen und durch verschiedene Formulierungen der einzelnen Experten kann es zu Duplikaten kommen. Das Verhindern von Duplikaten ist bei dieser Strategie besonders zeitaufwendig und die benötigte Zeit nimmt von Experte zu Experte zu. Dies liegt an der stetig steigenden Menge von Kritikalitätsphänomenen, die vor dem Hinzufügen neuer Kritikalitätsphänomene durchgegangen werden müssen.

Das Bilden mehrerer Expertengruppen vereint beide Ansätze. Für diese Methode gibt es zu dem zwei Durchführungsmöglichkeiten:

- Fachgruppen
- Mischgruppen

Dabei werden in der ersten Möglichkeit Gruppen aus Experten des gleichen Bereichs oder zumindest aus ähnlichen Bereichen gebildet, während bei der zweiten Möglichkeit ein Durchschnitt der Bereiche gebildet wird. Auch hier haben beide Möglichkeiten Vor- und Nachteile.

Bei der Bildung von Fachgruppen kann tiefer in die einzelne Bereiche vorgedrungen werden. Allerdings werden fachübergreifende Kritikalitätsphänomene weniger betrachtet.

Mischgruppen können sich besser auf fachübergreifende Kritikalitätsphänomene konzentrieren, dringen dafür jedoch nicht so tief in die einzelne Bereiche vor.

Zur Erkennung durch Expertenwissen zählen auch Befragungen von Autofahrern.

#### 3.1.4 Datengetriebene Ansätze

Auch im Bereich der datengetriebenen Ansätze gibt es verschiedene Ansätze. Diese können parallel verfolgt werden. Diese Ansätze unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Daten.

Beispiele für Daten, die in diesem Bereich eingesetzt werden können, sind:

- Fahrschulkataloge
- Unfalldatenbanken
- Videos aus Fahrkameras
- Sensordatenblätter

Aus diesen Daten können dann Situationen, die mit einer erhöhten Kritikalität assoziiert sind (z. B. Fragen im Fahrschulkatalog, die auf das Erkennen problematischer Situationen abzielen) extrahiert werden. Dazu werden die für das Auftreten der Situation benötigten Einflussfaktoren analysiert. Aus dem hier generierten Wissen können anschließend natürlichsprachliche Kritikalitätsphänomene abgeleitet werden.

### 3.1.5 Mögliche Verbesserung des Erkennens von Kritikalitätsphänomenen

Das Erkennen von Kritikalitätsphänomenen ist mit einem hohen Aufwand verbunden, der durch die von menschlichen Experten zu bewältigende Arbeit des Betrachten und Analysieren von Verkehrssituationen (oder anderer Medien) einhergeht. Dieser Aufwand pro Kritikalitätsphänomen wird bei der Betrachtung des täglichen Verkehrs (z.B. über Videos) zunehmend höher, je mehr Kritikalitätsphänomene bereits zusammengetragen wurden, da mehr Material mit bereits bekannten Kritikalitätsphänomenen gesichtet werden muss, bevor ein neues Kritikalitätsphänomen auftritt.

Während die neuen Kritikalitätsphänomene menschliche Klassifizierung benötigen, wäre es denkbar den vorigen Schritt der Sichtung und Sortierung in bereits bekannte und neue Kritikalitätsphänomene in den Bereich des maschinellen Lernens auszulagern.

## 3.2 Formulieren von Kritikalitätsphänomenen

Wurden Kritikalitätsphänomene erkannt, ist der nächste notwendige Schritt, diese zu notieren, um eine konkrete Grundlage zu schaffen. Diese Grundlage wird benötigt, um die Ergebnisse geeignet austauschen und diskutieren zu können. Ziel hierbei ist außerdem, die Faktoren der Verkehrswelt möglichst umfassend wiederzugeben, ohne alle möglichen Situationen explizit aufzulisten. Eine solche Aufzählung ist nach der Arbeit von Poddey et al. nicht umsetzbar [Pod+19]. Es muss also eine erste Abstraktion von der konkreten Situation erfolgen. In dieser Arbeit gehört zu diesem Schritt die Erörterung eines strukturellen Metamodells für die Formulierung der Kritikalitätsphänomene in natürlicher Sprache, das zum Beispiel durch eine entsprechende Grammatik oder durch strukturierte Vorgaben für die Notation gegeben werden kann.

### 3.2.1 Formulieren von Kritikalitätsphänomenen in verwandten Arbeiten

Aktuelle Arbeiten setzen oft nach der Formulierung der Kritikalitätsphänomene an oder berücksichtigen diese nur implizit (vgl. [OAM17; Maj+21; FV10]). Es wird davon ausgegangen, dass es bereits ermittelte Kritikalitätsphänomene gibt oder ein Experte an der Formalisierung arbeitet.

Im Bereich des Requirement Engineering ist im Zusammenhang mit der Anforderungserhebung einige Arbeit zu natürlichsprachlicher und semi-formaler Formulierung geleistet worden. Dies entspricht nicht genau der Formulierung von Kritikalitätsphänomenen, da diese nur zur Anforderungserhebung herangezogen werden können, das Prinzip ist jedoch ähnlich. So basiert Requirement Engineering beispielsweise zum größten Teil, wie auch die Erhebung von Kritikalitätsphänomenen, auf Abstraktion [RP92]. Buzhinsky liefert in seiner Arbeit eine Zusammenfassung bestehender Ansätze im Bereich der Anforderungsformalisierung [Buz19].

Besonders bezogen auf die Anforderungserhebung ist Validierung ein wichtiger Aspekt, da diese, wie bereits beschrieben, auf den Anforderungen basiert. Nach C. Rolland und C. Proix haben Analysten oft Schwierigkeiten, die reale Welt in Konzepte herunterzubrechen, während die analytische Anwendung von Konzepten eines Modells leicht fällt.

Innerhalb der Validierung werden jedoch sowohl Analyse als auch Modellierung benötigt. Daher geben C. Rolland und C. Proix die Notwendigkeit eines Werkzeuges an, das den Prozess des Requirement Engineering unterstützt und dem gewohnten analytischen Ansatz eher entspricht [RP92].

Das ALECSI [CPR91] (akademisch auch: OICSI) ist ein Prototyp dieses Werkzeuges, das natürliche Sprache in Konzepte übersetzt. Dabei unterstützt es den Benutzer, indem nach Eingabe der natürlichsprachlichen Formulierung Eigenschaften des Konzeptes zurückgegeben werden, die nachfolgend überprüft werden können. Entspricht das Ergebnis nicht den Erwartungen, so muss in der natürlichsprachlichen Formulierung auch etwas unstimmig sein und korrigiert werden [RP92].

Für den Bereich der Kritikalitätsphänomene existiert ein solches Werkzeug zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

### 3.2.2 Erzeugen eines kontrollierten Vokabulars

Für eine effiziente (bzw. automatisierte) Formalisierung der versprachlichten Kritikalitätsphänomene bietet es sich an, Begriffe eines kontrollierten Vokabulars zu verwenden. In diesem werden nur Begriffe mit eindeutiger, definierter Bedeutung aufgenommen. Wörter mit missverständlicher Bedeutung oder verschiedene Wörter, die die gleiche Entität bezeichnen, existieren in diesem Vokabular nicht.

Einem Kritikalitätsphänomen, das unter Heranziehung eines solchen Vokabulars versprachlicht wurde, ist damit eine eindeutige Bedeutung zuzuordnen [ISO13].

### 3.2.3 Einteilung von Wörtern eines kontrollierten Vokabulars im Bereich der Verkehrswelt

Die Wörter eines kontrollierten Vokabulars lassen sich in verschiedene Gruppen unterteilen. Für die folgenden Abschnitte wurden nur Begriffe aus der Verkehrswelt betrachtet. Es ist durchaus denkbar, dass bei Betrachtung anderer Bereiche eine andere Aufteilung einen höheren Nutzen erzielt. Die hier angeführten Gruppen unterscheiden sich hauptsächlich im späteren Aufbau der Formalisierung (vgl. Abschnitt 3.3) Jedoch sind auch innerhalb der natürlichen Sprache Eigenschaften zu erkennen.

#### 3.2.3.1 Gruppe 1: Einfach verknüpfende Wörter

In dieser Gruppe sind Wörter, die zwei Entitäten miteinander in Beziehung stellen. Die Art dieser Beziehung ist dabei z.T. sehr verschieden (vgl. X kommt Y entgegen und X überquert Y). Je nach Beziehung stellt das Wort zusätzlich Anforderungen an die Arten der Entitäten. „Überqueren“ erfordert beispielsweise, dass die zu überquerende Entität tatsächlich überquerbar und dafür vorgesehen ist. Beispielhaft wäre die Entität „Kreuzung“ überquerbar, einer Entität „Fußgänger“ hingegen würde die Überquerung durch ein Auto erheblichen Schaden zufügen.

In dieser Gruppe sind vorrangig Verben zu finden.

#### 3.2.3.2 Gruppe 2: Eigenschaft-gebende Wörter

Die zweite Gruppe von Wörtern umfasst all die Wörter, die Relationen von Eigenschaften auf eine Entität abbilden. Darunter fallen Begriffe wie „blinken“, die einer Entität den Wert einer Eigenschaft (blinken = wahr) zuschreiben, sofern diese Eigenschaft für die Entität definiert ist. Je nach Art dieser Definition kann ein solches Wort verschiedene Auswirkungen haben. Unter einem blinkenden Auto wird z. B. meist etwas anderes verstanden (Blinker nach links oder Blinker nach rechts) als bei dem Begriff „blinkender Fußgänger“. In dieser Gruppe sind hauptsächlich Adjektive zu finden.

#### 3.2.3.3 Gruppe 3: Mehrfach verknüpfende Wortgruppen

Die dritte Gruppe von Wörtern umfasst alle  $n$ -stelligen Wörter, bei denen  $n > 2$  gilt. Darunter fallen beispielsweise Verb-Präpositions Kombinationen wie „verdecken“ und „für“ (Objekt A verdeckt Objekt B für Objekt C).

### 3.2.4 Erstellen einer Grammatik zur Formulierung von Kritikalitätsphänomenen

Betrachtet man die Verknüpfungen der einzelnen Gruppen genauer, so ergibt sich, dass sich aus der Verwendung entsprechender Begriffe die Notwendigkeit für die Existenz einer minimalen Anzahl Entitäten ergibt. Dies lässt den Schluss zu, dass es möglich ist die einzelnen Begriffe des kontrollierten Vokabulars in eine Grammatik einzugliedern, die sich bei genauer Einteilung der Begriffe als kontextfreie Grammatik darstellen lässt. Voraussetzung hierfür ist, dass Begriffe, die Entitäten mit gewissen Eigenschaften erfordern, zu einer Verknüpfung mit einem Nichtterminal abgeleitet werden, das wiederum nur zu Entitäten mit genau dieser Eigenschaft abgeleitet werden kann.

Eine Angabe einer kontextfreien Grammatik, die ein gesamtes Vokabular der Verkehrswelt abbildet, steht noch aus. Grundsätzlich kann sich dieser Ansatz wie folgt vorgestellt werden:

$$\begin{aligned}
 G_{KP} &= (N, T, P, S) \\
 N &= \{S, H, O, W, V\} \\
 T &= \{\text{auto, regen, kreuzung, existenz von, fußgänger, radfahrer, überholt, überquert}\} \\
 P &= \{S \rightarrow V | \text{existenz von } W, \\
 &\quad V \rightarrow H \text{ überquert } O | H \text{ überholt } H | V \text{ und } V | V \text{ und danach } V | V \text{ und existenz von } W, \\
 &\quad H \rightarrow \text{auto} | \text{radfahrer} | \text{fußgänger}, \\
 &\quad W \rightarrow \text{regen}, \\
 &\quad O \rightarrow \text{kreuzung}\}
 \end{aligned}$$

Eine beispielhafte Ableitung dieser Grammatik ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

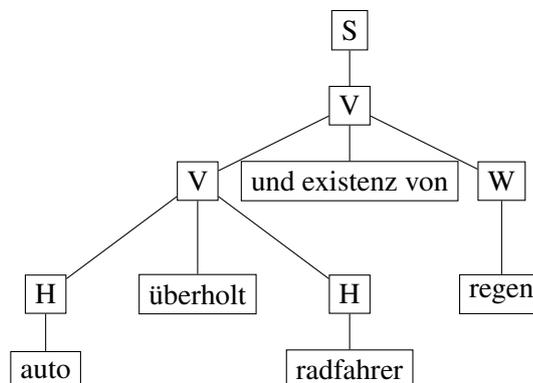


Abbildung 3.2: Ableitungsbaum eines Wortes der Grammatik  $G_{KP}$

Wörter müssen dabei nicht genau einem Nichtterminal zugeordnet werden. Es ist durchaus möglich einen Begriff, dessen Bedeutung zwei bestimmte Eigenschaften hat, auch zwei (oder mehr) entsprechenden Nichtterminalen zuzuordnen. Es darf jedoch nie der Fall sein, dass ein Begriff abgeleitet werden kann, dessen Bedeutung die für das entsprechende Nichtterminal nötige Eigenschaft nicht hat.

Eine solche Grammatik ist bei genauer Dokumentierung leicht erweiterbar, da zu ergänzende Entitätsbegriffe mittels der entsprechenden Eigenschaften eingeordnet werden können. Neue Verknüpfungen können auf die gleiche Weise ergänzt werden. Hier muss darauf geachtet werden, dass die passenden Nichtterminale gewählt werden, um benötigte Eigenschaften einzuhalten.

### 3.3 Formalisieren von Kritikalitätsphänomenen

Für den dritten Schritt des Prozesses, die Formalisierung, wird im Rahmen der Arbeit eine passende Ontologie zusammengestellt und für die Formalisierung beispielhafter Kritikalitätsphänomene verwendet. Es ist zu erörtern, welche Arten von zugrundeliegenden Einflussfaktoren hierzu benötigt werden und wie sie in der Ontologie dargestellt werden sollten.

Im nächsten Schritt wird eine Ontologie erstellt, deren Beschreibung durch Beschreibungslogik als Grundlage für die Abbildung von Entitäten und ihren Relationen und Eigenschaften dient. Sie bildet damit die Basis der in dieser Arbeit verwendeten Formalisierungshierarchie. Um eine Formalisierung zeitlich relevanter Kritikalitätsphänomene gewährleisten zu können, wird anschließend eine zeitliche Logik in die Beschreibungslogik eingebettet. Abschließend werden in jedem Zeitintervall räumliche Spezifikationen mittels einer Kombination räumlicher Logiken angegeben.

Eine visuelle Darstellung dieser Hierarchie ist in Abbildung 3.3 zu finden.

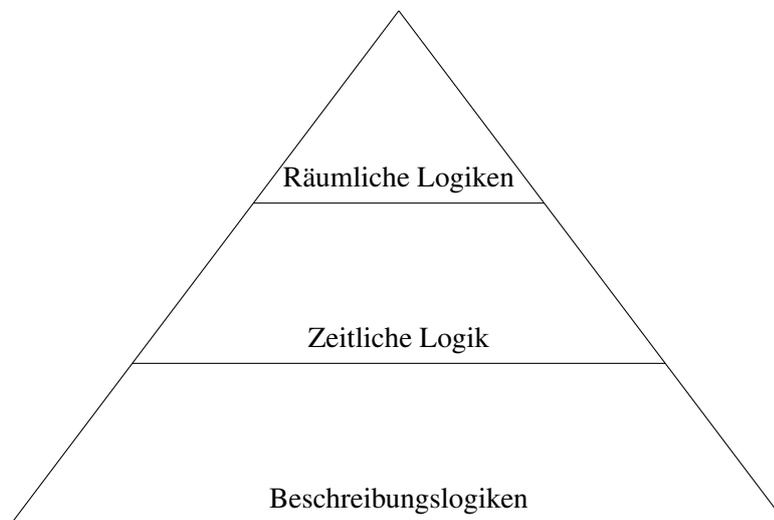


Abbildung 3.3: Hierarchie der in dieser Arbeit verwendeten Logiken.

Ergänzend soll in dieser Arbeit geprüft werden, inwieweit eine automatisierte Formalisierung ausgehend von einer Formulierung in natürlicher Sprache möglich ist.

#### 3.3.1 Formalisieren von Kritikalitätsphänomenen in verwandten Arbeiten

Eine Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen für Szenarien wird in Arbeiten bereits verwendet. So ist in [OAM17] eine formale Beschreibung von Szenarien für die Anwendung innerhalb einer Werkzeugkette für automatisierte Fahrzeuge entwickelt worden. Dafür wurde eine Beschreibungssprache genutzt, die speziell für diesen Anwendungsfall aufgebaut ist. Mithilfe dieser Sprache können Szenarien entwickelt werden, die spezifische, sicherheitskritische Situationen enthalten. Es entsteht ein ausführbares Modell, für das Testfälle generiert werden können. Außerdem ist es möglich, die Erreichbarkeit von Zuständen in Szenarien zu überprüfen [OAM17].

Eine Methode ist beispielsweise die händische Überführung von natürlicher Sprache in die Beschreibungssprache aus der Arbeit von OKelly [OAM17]. An dieser Stelle sind die bereits erwähnten Pro-

bleme der Formulierung und der Differenzen im Wortschatz jedoch noch gegeben. Die daraus entstehenden Unklarheiten erschweren anschließende Analysen.

Der Ansatz von Buitelaar ermöglicht es, natürliche Sprache, in diesem Fall in Form von Fließtext, direkt in Protégé umzusetzen [BOS04].

Die Arbeit von Kraines et al. präsentiert mit einem anderen Ansatz ein Programm, das Experten erlaubt, semantische Beschreibungen ihres Wissens anzufertigen. Dabei müssen die Experten zwar die semantische Beschreibung selbst ausarbeiten, werden aber von dem Programm unterstützt, sodass es durch die Vorgaben des Programms leichter ist, konsistente Beschreibungen zu verfassen. Damit wird das Problem der Formulierung und der uneinheitlichen terminologischen Basis angegangen [Kra+06].

### 3.3.2 Wahl der Tools und Logiken

Für die Formalisierung musste zunächst für alle benötigten Informationen eine geeignete Logik-Form gewählt werden. Folgende Ebenen sind dabei abzudecken:

- Entitäten & deren Eigenschaften
- zeitliche Relationen
- räumliche Relationen

#### 3.3.2.1 Ebene der Entitäten

Die folgenden Paragraphen beschreiben die für die Formalisierung der Entitäten benötigten Informationen und den Vorgang für deren Formalisierung.

##### Logik

Um in den Kritikalitätsphänomenen auftretenden Entitäten in einer formalen Darstellung einbringen zu können, wird in dieser Arbeit Beschreibungslogik (vgl. Unterabschnitt 2.3.1) mit einer selbst erstellten Ontologie verwendet. Für das Erstellen der Ontologie, welche für die Einteilung der Entitäten in beschreibungslogische Klassen genutzt wird, wird OWL2 mithilfe von Protégé eingesetzt (vgl. Unterabschnitt 2.3.2.1 und Unterabschnitt 2.3.2.2).

##### Formalisieren von Entitäten

In der Formalisierung muss die Existenz von Entitäten, die bestimmten ontologischen Klassen zugeordnet sind, vorausgesetzt werden. Dies ist mittels Beschreibungslogik nicht möglich. In dieser Arbeit wird für die Formalisierung der Entitäten daher eine eigene, angepasste Syntax verwendet.

Um Entitäten innerhalb der Formalisierung zu instantiiieren wird die Existenz einer mittels einer Variablen referenzierbaren Entität der entsprechenden Klasse vorausgesetzt. Ein entsprechender Teil einer logischen Aussage ist damit die folgende:

$$\exists v \in Class : V : \dots$$

Dabei bezeichnet die Variable  $v$  eine Entität der Klasse  $V$ .

Für Nichtexistenz von Entitäten einer gewissen Klasse kann innerhalb der Formalisierung die entsprechende Negation der zuvor beschriebenen Formel verwendet werden:

$$\neg \exists v \in \text{Class} : V : \dots$$

Zusätzlich kann auch die Art der Klasse negiert werden. Somit kann die Existenz einer Entität angegeben werden, die nicht einer gewissen Klasse angehört. Dies wird innerhalb der Formalisierung wie folgt bezeichnet:

$$\exists v \notin \text{Class} : V : \dots$$

### Referenzieren von Entitäten

Nachdem die Existenz angenommen wurde, können die entsprechenden Variablen verwendet werden, um auf die Entitäten zu referenzieren. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten, um weitere Aussagen über die einzelnen Entitäten zu treffen:

- Relationen zwischen zwei Entitäten
- Eigenschaften einer Entität

Innerhalb der Beschreibungslogik ist es dabei tatsächlich nur möglich, eine Relation zwischen genau zwei Entitäten zu definieren. Mehrstellige Relationen, wie sie in Unterunterabschnitt 3.2.3.3 beschreiben sind, müssen innerhalb der Beschreibungslogik daher durch Hinzunahme weiterer Klassen definiert werden. Für eine Relation  $R$  und Variablen  $v, x$  schreiben wir

$$v R x$$

wenn zwischen  $x$  und  $v$  die Relation  $R$  besteht.

Eine Eigenschaft  $e$  einer Entität mit dem Bezeichner  $v$  können durch die folgende Aussage referenziert werden:

$$v.e$$

Diese Eigenschaften werden auch in der Ontologie als mögliche Eigenschaften der entsprechenden Klasse angegeben. Innerhalb der Formalisierung sind damit Aussagen über die Eigenschaften der Entitäten möglich. Hierbei handelt es sich, wie auch bei der Aussage über die Existenz einer Entität einer Klasse, um eine Ergänzung der Syntax von DL.

Beide Arten von Aussagen können in der Formalisierung beliebig eingebracht und logisch verknüpft werden.

### Existenz von Intervallen

Um auf der zeitlichen Ebene auf Intervalle referenzieren zu können, müssen diese zunächst eingeführt werden. Dies geschieht wie auch bei Entitäten über die Einführung mittels eines Existenzquantors, die alle benötigten Intervalle  $i_1, \dots, i_n$ ,  $n \in \mathbb{N}, n \geq 1$  sowie ein zugrundeliegendes Intervall  $p$ , welches die gesamte Zeitspanne des Auftretens des Kritikalitätsphänomens beschreibt, aus einer Menge  $I$  von Intervallen bestimmt (vgl. Unterunterabschnitt 3.3.2.2). Diese werden anschließend in der zeitlichen Ebene der Formalisierung referenziert.

### 3.3.2.2 Zeitliche Ebene der Formalisierung

In den folgenden Paragraphen werden die für die Formalisierung benötigte zeitliche Logik und ihr Einsatz beschrieben.

#### Zeitliche Logik

Für die zeitliche Komponente der Formalisierung wurde ATL gewählt (siehe Unterabschnitt 2.4.2). Diese Logik bietet sich für die Formalisierung von Zeitaspekten innerhalb von Kritikalitätsphänomenen an, da sie parallele Zeitstränge erlaubt (z. B. Gegenverkehr während des Befahrens einer Kreuzung) und zudem die Analyse von Abstraktion erlaubt (siehe Unterunterabschnitt 3.4.2.3 und Abschnitt 4.4).

#### Formalisierung zeitlicher Konzepte

Um mithilfe von ATL die zeitlichen Konzepte von Kritikalitätsphänomenen logisch darzustellen, werden die entsprechenden Prädikate von ATL verwendet. Durch diese wird eine Abfolge von Zeitintervallen erzeugt, für die auf der räumlichen Ebene die entsprechenden Vorgänge definiert werden können.

Dieses Konzept ähnelt dem der *Traffic Sequence Charts* (kurz: TSCs, vgl. [Dam+18]). Bei diesem Vorgehen werden einzelne Szenen jedoch grafisch dargestellt. Dies spezifiziert räumliche Zusammenhänge genauer, als es für die Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen nötig ist.

#### Beispiel

Als Beispiel kann die in Abbildung 3.4 dargestellte Intervallfolge angenommen werden.



Abbildung 3.4: Beispielhafte Intervallsequenz ohne Parallelität

In ATL ergäbe sich hierfür:

$$\text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Meets}(i_2, i_3)$$

Ein komplexeres Beispiel ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

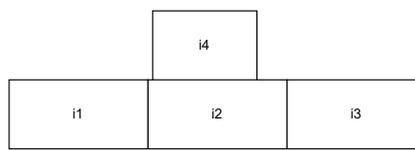


Abbildung 3.5: Beispielhafte Intervallsequenz mit Parallelität

Für dieses ergibt sich folgende Aussage in ATL:

$$\text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{During}(i_4, i_2)$$

### Grundlegendes Intervall

Um die in dieser Arbeit vorgestellte Analyse (siehe Abschnitt 3.4) durchführen zu können, ist es notwendig, dass jedes Kritikalitätsphänomen mit einem zugrundeliegenden Intervall formalisiert wird. Dieses Intervall beschreibt den gesamten Zeitraum, in dem das Kritikalitätsphänomen abläuft. Für ein grundlegendes Intervall  $p$  und ein Intervall  $i_1$ , welches den Beginn des Kritikalitätsphänomens bezeichnet, wird daher folgende Aussage in die Formel mit aufgenommen:

$$\text{Starts}(i_1, p)$$

Für alle Intervalle, die zeitlich zwischen  $i_1$  und dem letzten Intervall  $i_n$  in der Sequenz des Kritikalitätsphänomens liegen, ist eine andere Aussage aufzunehmen. Für ein Beispielintervall  $i_2$  lautet diese:

$$\text{During}(p, i_2)$$

Um das Ende des grundlegenden Intervalls zu bestimmen, wird es mit dem letzten Intervall  $i_n$  verknüpft:

$$\text{Finishes}(i_n, p)$$

Für Kritikalitätsphänomene mit nur einem Intervall ergibt sich, dass dieses das Intervall starten und beenden muss, die Intervalle sind damit identisch. Ein Beispiel hierfür ist in Unterabschnitt 4.3.3 zu finden.

### 3.3.2.3 Räumliche Ebene der Formalisierung

In dieser Arbeit wird für die räumlichen Aussagen die Menge von Aussagen mit der minimal notwendigen Aussagekraft angegeben. Daraus ergibt sich, dass mit einer Formel nur die benötigten Instanzen bezeichnet und geometrisch angeordnet werden, die imperativ für das Auftreten des Kritikalitätsphänomens sind. Alle übrigen Faktoren werden bewusst nicht näher bezeichnet, sodass die Formel möglichst allgemein bleibt und keine Einschränkungen gemacht werden, die nichts mit dem Auftreten des Kritikalitätsphänomens zu tun haben.

In den folgenden Abschnitten werden die Logiken für die räumliche Ebene sowie die sich daraus ergebende Formalisierung der Kritikalitätsphänomene vorgestellt.

#### Räumliche Logik

Auf der dritten Ebene der Formalisierung befinden sich die Positionen der Entitäten innerhalb des Kritikalitätsphänomens. Um diese geeignet anzugeben, muss die entsprechende Logik genug Abstraktion erlauben, damit die Eigenschaften einer T-Box erhalten bleiben und trotzdem konkrete Bewegungen und Beziehungen zwischen Entitäten erlauben.

Dies wird durch die Kombination von *RCC8* (siehe Unterabschnitt 2.5.2) mit dem *Double Cross Calculus* (kurz: *DCC*, siehe Unterabschnitt 2.5.3) gegeben.

Der *RCC8* erlaubt es, Angaben über die Position von Entitäten auf Straßenabschnitten zu machen, während der *DCC* ausgehend von (geeignet gewählten) Punkten Angaben über relative Positionen ermöglicht.

### Formalisierung räumlicher Konzepte

In dieser Arbeit wird angenommen, dass für die Verwendung des DCCs geeignete Punkte gewählt sind (beispielsweise die Stoßstange eines Fahrzeugs für nach vorn gerichtete Positionierungen).

Mit dieser Annahme können anhand zweier Punkte im Raum relative Positionen von Entitäten festgelegt werden. Zusätzlich erlaubt der RCC8 es, Aussagen darüber zu machen, auf welchem Straßennetzabschnitt sich ein Fahrzeug befindet, welche Abschnitte aneinander grenzen und welche räumlichen Konzepte an disjunkten geometrischen Orten vorliegen müssen.

Die sich daraus ergebenden Terme können anschließend logisch verknüpft für die einzelnen Intervalle angegeben werden. Bleiben gewisse räumliche Gegebenheiten (beispielsweise die disjunkte Position von zwei Kreuzungsarmen) während des gesamten Kritikalitätsphänomens konstant, ist es zudem möglich diese Konzepte auf der gleichen Ebene wie die der zeitlichen Konzepte darzustellen. Dies spart mehrfaches Aufnehmen der gleichen Aussage. Für eine Analyse (vgl. Unterunterabschnitt 3.4.2.2) können diese Konzepte jederzeit wieder in die einzelnen Intervalle eingebettet werden.

### Beispiel der räumlichen Formalisierung

Betrachtet man bei Befahren einer Kreuzung das letzte Zeitintervall, in dem die Kreuzung verlassen wird, so ergibt sich mit folgenden Variablen

- $f$ : Entität der Klasse „Fahrzeug“
- $k$ : Entität der Klasse „Kreuzung“
- $x$ : Entität der Klasse „Kreuzungsverbindung“
- $a_1$ : Entität der Klasse „Kreuzungsarm“
- $a_2$ : Entität der Klasse „Kreuzungsarm“

und der Information, dass das Fahrzeug von Kreuzungsarm  $a_1$  kam, diese formale, räumliche Aussage:

$$(a_1 \text{ TPP } k) \wedge (a_2 \text{ TPP } k) \wedge (x \text{ NTPP } k) \wedge (a_1 \text{ DC } a_2) \wedge (a_1 \text{ EC } x) \wedge (a_2 \text{ EC } x) \wedge (f \text{ NTPP } a_2)$$

Da hier keine Angaben bezüglich Richtungen gemacht werden müssen, ist keine Verwendung des DCC nötig.

Dies ändert sich, wenn statt dem Befahren einer Kreuzung, Rechtsabbiegen an einer Kreuzung betrachtet wird:

$$(a_1 \text{ TPP } k) \wedge (a_2 \text{ TPP } k) \wedge (x \text{ NTPP } k) \wedge (a_1 \text{ DC } a_2) \wedge (a_1 \text{ EC } x) \wedge (a_2 \text{ EC } x) \wedge (f \text{ NTPP } a_2) \\ \wedge \text{rp}(a_1, x : a_2)$$

Hierbei wird nun die zusätzliche Information  $\text{rp}(a_1, x : a_2)$  benötigt, die mit der angenommenen, geeigneten Wahl der Punkte die Aussage hinzufügt, dass sich der Kreuzungsarm  $a_2$  vom Kreuzungsarm  $a_1$  Richtung Verbindungsstück  $x$  blickend rechts befindet (siehe Abbildung 2.4).

### 3.3.3 Formalisierungsbeispiele

Im folgenden Abschnitt sind einige Beispiele zur Verdeutlichung der einzelnen Aspekte der Formalisierung angegeben. Komplexere Beispiele von Kritikalitätsphänomenen aus der Praxis sind in Abschnitt 4.3 und den Beispielen in Abschnitt 3.4 zu finden.

#### 3.3.3.1 Existenz des Wetterzustands Regen

Soll die Existenz von Regen angegeben werden, wird zusätzlich zum übergeordneten Intervall  $p_r$  nur ein Intervall  $i_r$  benötigt. Bei Wetter wird davon ausgegangen, dass (sofern nicht anders angegeben) sich Wetter über den gesamten betrachteten Bereich erstreckt. Daher gilt:

$$\exists r \in \text{Class:Regen}, i_r, p_r \in I : \text{Equal}(i_r, p_r)$$

#### 3.3.3.2 Linksabbiegen

Ein etwas komplexeres Beispiel, das sowohl zeitliche als auch räumliche Aussagen benötigt ist das Manöver des Linksabbiegens. Die zugehörige formale Aussage benötigt zusätzlich zum übergeordneten Intervall  $p_l$  drei weitere Intervalle  $i_1, i_2, i_3$ . Mit diesen werden die Vorgänge des Anfahrens der Kreuzung, des Befahrens der Kreuzung und des Verlassens der Kreuzung beschrieben. Die Kreuzung mit mindestens zwei Armen und einem Verbindungsstück muss genauso wie das abbiegende Fahrzeug in den Entitäten aufgenommen werden. Außerdem müssen die Kreuzungsarme räumlich in Beziehung gesetzt werden. Es ergibt sich die folgende Formalisierung:

$$\begin{aligned} &\exists fz \in \text{Class:Fahrzeug}, k \in \text{Class:Kreuzung}, \text{hintererArm}, \text{linkerArm} \in \text{Class:Kreuzungsarm}, v \in \\ &\text{Class:Verbindung}, i_1, i_2, i_3, p_l \in I : \\ &k \text{ hat\_Arm hintererArm} \wedge k \text{ hat\_Arm linkerArm} \wedge k \text{ hat\_Verbindung } v \\ &\wedge lp(\text{hintererArm}, v : \text{linkerArm}) \wedge \text{linkerArm EC } v \wedge \text{hintererArm EC } v \\ &\wedge \text{Starts}(i_1, p_l) \wedge \text{During}(i_2, p_l) \wedge \text{Finishes}(i_3, p_l) \wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \\ &\text{Holds}((fz \text{ NTTP hintererArm}), i_1) \wedge \text{Holds}(fz \text{ NTTP } v, i_2) \wedge \text{Holds}(fz \text{ NTTP linkerArm}), i_3) \end{aligned}$$

### 3.3.4 Kritikalitätsphänomene nach der Formalisierung

Für formalisierte Kritikalitätsphänomene können drei, in Definition 3.3.1 beschriebene Funktionen angewendet werden:

**Definition 3.3.1** (Funktionen auf formalisierten Kritikalitätsphänomenen). Folgende Funktionen werden für formalisierte Kritikalitätsphänomene definiert:

- Entitäten\_von (KP): Gibt alle in einem formalisierten Kritikalitätsphänomen KP enthaltenen Bezeichner von Entitäten zurück.
- Intervalle\_von (KP): Gibt alle in einem formalisierten Kritikalitätsphänomen KP festgelegten Zeitintervalle aus  $I$  zurück.
- Raumaussagen\_von (KP,  $i$ ): Gibt alle in einem formalisierten Kritikalitätsphänomen KP enthaltenen Raumaussagen zurück, die in einem Zeitintervall  $i \in I$  gelten.

Mithilfe dieser Funktionen können zudem drei Mengen definiert werden:

**Definition 3.3.2** (Mengen innerhalb formalisierter Kritikalitätsphänomene). Für formalisierte Kritikalitätsphänomene werden folgende Mengen definiert:

- $\text{Ent}_{\text{KP}} := \text{Entitäten\_von}(\text{KP})$
- $\text{I}_{\text{KP}} := \text{Intervalle\_von}(\text{KP})$
- $\text{Raum}_{\text{KP}} := \{ r_{\text{KP},i} \mid i \in \text{I}_{\text{KP}} \}$  wobei  $r_{\text{KP},i} = \text{Raumaussagen\_von}(\text{KP}, i)$

Mithilfe der zuvor angegebenen Formalisierung und den zusätzlichen Definitionen lässt sich eine Definition eines nach vorangegangenem Vorgehen formalisierten Kritikalitätsphänomens angeben:

**Definition 3.3.3** (Formalisiertes Kritikalitätsphänomen). Ein formalisiertes Kritikalitätsphänomen

$$A = (\text{Ent}_A, I_A, \text{Raum}_A, \Phi(\text{Ent}_A, I_A, \text{Raum}_A))$$

besteht aus den in Definition 3.3.2 bezeichneten Mengen und der logischen Verknüpfung  $\Phi$ , die die Elemente der Mengen miteinander in Beziehung stellt und der eigentlichen Formel der Formalisierung entspricht.  $\Phi$  enthält somit:

- Aussagen über die Entitätsbezeichner und die zugehörigen Klassen aus der Ontologie
- Aussagen über die Intervalle aus  $I_A$  in zeitlicher Logik (hier: ATL)
- Aussagen über die Entitätsbezeichner im Raum mittels räumlicher Logik
- die Verknüpfung der Raumaussagen mit den entsprechenden Zeitintervallen (hier: mittels  $\text{Holds}(r_{\text{KP},i}, i)$  aus ATL)

### 3.4 Analyse von Kritikalitätsphänomenen

Die Ontologie, die den Klassen innerhalb der Formalisierung in Abschnitt 3.3 zugrundeliegt, wurde anhand sogenannter Kompetenzfragen (engl. Competency Questions) entwickelt. Diese Fragen beschreiben relevante Eigenschaften von Kritikalitätsphänomenen, die nachweisbar sein sollten und in Tabelle 3.1 dargestellt sind. Zur Beantwortung dieser Fragen können verschiedene Analysen eingesetzt werden.

*Tabelle 3.1: Aufschlüsselung der Kompetenzfragen (Tabelle aus [Wes+22]).*

Reasoning	DL notation	Explanation	Example	ID
<i>A-Box</i>	$S_{CP_x}(s)$	Membership of a scenario $s$ within a scenario class $S_{CP_x}$	Does the scenario have an occluded pedestrian?	A1
	$CP_x(i)$	Membership of an individual $i$ within a criticality phenomenon $CP_x$	Is the pedestrian occluded?	A2
	$\exists \text{object}_{CP_x}^{-1}.T(i)$	Membership of an individual $i$ as a object of a criticality phenomenon $CP_x$	In the given scenario, is the ego vehicle causing an occlusion?	A3
	$\mathcal{O} \models \text{Scenario}(s)$	Consistency of observed scenario $s$ with the modeled knowledge?	Is the perceived pedestrian with 40km/h consistent with the modeled knowledge?	A4
<i>T-Box</i>	$S_{CP_1} \sqcap \dots \sqcap S_{CP_n} \sqsubseteq \perp$	Compatibility of a set of criticality phenomena	Can the criticality phenomena foggy night and sun glare be satisfied in one scenario?	T1
	$S_{CP_1} \sqsubseteq S_{CP_2}$	Abstraction relation of criticality phenomena	Is the concretization of the criticality phenomenon occluded road user into occluded vehicle and occluded pedestrian correct?	T2
	$\text{Scenario} \sqsubseteq S_{CP_1} \sqcup \dots \sqcup S_{CP_n}$	Completeness of a set of scenario classes	Is the scenario space decomposition into right and left turn maneuvers complete?	T3

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Analyse von Relationen zwischen Kritikalitätsphänomenen. Dazu zählt unter anderem das Überprüfen, ob eine Abstraktionsrelation zwischen zwei Kritikalitätsphänomenen vorliegt (T2 in Tabelle 3.1). Bei der Überprüfung soll z. B. automatisiert bestimmt werden, ob zwischen zwei formalisierten Kritikalitätsphänomenen solche Abstraktionsrelationen bestehen.

Außerdem wird eine Inferenz auf der T-Box durchgeführt, die Analysen auf konzeptueller Ebene nutzt um Ergebnisse zu erzielen, die ebenfalls konzeptueller Natur sind und daher nicht die Instanziierung der Kritikalitätsphänomene erfordern (vgl. [Baa+03, Absatz 2.2.4]). Die Analyse im vierten Schritt basiert auf dieser Formalisierung, auf die Inferenzwerkzeuge angewandt werden.

Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse können beispielweise im Bereich der Kritikalitätsanalyse (vgl. [Neu+21]) eingesetzt werden. Die Formalisierung kann im sogenannten *Abstraction-/Refinement-Loop* genutzt werden. Bei diesem Verfahren geht es darum, das auszuarbeitende Artefakt (in diesem Fall einen Katalog von Kritikalitätsphänomenen) schrittweise zu verbessern, bis das Optimum erreicht wird oder zumindest keine signifikante Verbesserung durch weitere Iteration eintritt. Im Falle eines Katalogs für Kritikalitätsphänomene bedeutet dies beispielsweise das schrittweise Hinzufügen neuer Kritikalitätsphänomene, die entdeckt wurden, die stetige Überprüfung der bereits angelegten Menge auf Fehler und Inkonsistenzen und damit zusammenhängend das Finden eines geeigneten Abstraktionslevels [Neu+21]. Die Formalisierung in dieser Arbeit ermöglicht gemeinsam mit einer automatisierten Analyse eine einfachere und vor allem schnellere Überprüfung bezüglich der Existenz eines neu eingefügten Kritikalitätsphänomens und von Relationen zwischen diesem und bereits angelegten Kritikalitätsphänomenen.

### 3.4.1 Analyse von Kritikalitätsphänomenen in verwandten Arbeiten

Im Bereich der DL Inferenz, die die Auswertung beschreibungslogischer Aussagen bezeichnet, ist bezüglich der Analyse bereits einige Arbeit geleistet worden. Es gibt zahlreiche Algorithmen, die die Inferenz verschiedener Relationen oder Eigenschaften automatisieren. Für OWL wurde von García-Peñalvo et al. eine Zusammenfassung der Analysen der gängigsten Werkzeuge veröffentlicht [FJR11]. So kann Protégé beispielsweise Inkonsistenzen innerhalb einer der Formalisierung zugrundeliegenden Ontologie erkennen. Eine Inkonsistenz bezeichnet im Kontext der Ontologien die Tatsache, dass ein modelliertes Konzept nie eine erfüllende Instanz hat [Baa+03]. Ein Beispiel hierfür ist eine Ontologie, in der alle Autos als Fahrzeuge mit fünf Türen definiert sind, es jedoch auch Smarts mit nur drei Türen gibt, die Autos sind. Dies wäre ein Widerspruch und somit ist die Ontologie, in der diese Konzepte zeitgleich enthalten sind, inkonsistent.

In dieser Arbeit wird im Bereich der Analyse der Fokus auf die Erkennung von Abstraktions- (und damit auch Konkretisierungs-) Relationen gelegt. Hierfür muss auf jeder Ebene der Formalisierung (vgl. Abschnitt 3.3) die Abstraktion möglich sein und auf mindestens einer Ebene eine Abstraktion vorliegen. Was genau eine Abstraktion einer Ebene erfordert, wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert und formal notiert.

### 3.4.2 Analyse der Abstraktions-Relation $\sqsubseteq_{\text{abs}}$

In den folgenden Abschnitten werden die Bedingungen für die Existenz einer Abstraktionsrelation zwischen zwei Kritikalitätsphänomenen beschrieben. Voraussetzung dafür ist, dass die Kritikalitätsphänomene nach dem Prinzip aus Abschnitt 3.3 formalisiert wurden.

Für die Analyse wird für jede Ebene der Formalisierung ein eigener Schritt definiert und im einzelnen erläutert, welche Bedingungen gelten müssen, wenn eine Abstraktion in diesem Schritt möglich ist.

Zusätzlich wird eine Zusammenfassung dieser Schritte als Analyse der gesamten Formalisierung (d.h. über alle Ebenen) vorgestellt und der Fall erläutert, dass über eine Ebene keine Aussage getroffen werden kann. Folgende Schritte werden nacheinander durchgeführt:

1. Prüfen von Entitätspaaren
2. Prüfen der räumlichen Formalisierung mithilfe der Entitäten auf Intervallpaaren
3. Prüfen von Intervallpaaren

Es handelt sich bei dieser Analyse um eine symbolische Analyse. Dies bedeutet, dass nur die in der Formel vorkommenden Bezeichner und ihre Relationen geprüft werden. Es wird kein Bezug zu realen Situationen hergestellt. Daher könnten die zu betrachtenden Elemente zu einer handhabbaren, abzählbaren Menge zusammengefasst werden.

### 3.4.2.1 1. Schritt: Analyse der Abstraktionsrelation $\sqsubseteq_{\text{abs}}$ auf Entitätenebene

Für den ersten Schritt der Analyse wird das kartesische Produkt der Entitäten der betrachteten Kritikalitätsphänomene gebildet. Damit wird sichergestellt, dass alle gültigen Abstraktionen der Entitäten gefunden werden können. Dann wird für jedes Element des kartesischen Produktes mit zwei Kritikalitätsphänomenen A und B geprüft, ob  $A \sqsubseteq_{\text{abs}} B$  gilt. Es entsteht eine Menge von Entitätspaaren  $\text{Ent}_{\text{Ent}_A \times \text{Ent}_B}$  ausgehend von der Menge der Entitäten des Kritikalitätsphänomens A, bezeichnet mit  $\text{Ent}_A$ , und der Menge der Entitäten des Kritikalitätsphänomens B, bezeichnet mit  $\text{Ent}_B$  (nach 2.1.2), die wie folgt bezeichnet werden kann:

$$\text{Ent}_{A \times B} := \text{Ent}_A \times \text{Ent}_B = \{(a, b) \mid a \in \text{Ent}_A, b \in \text{Ent}_B\} \quad (3.1)$$

Um mittels der Beschreibunglogik aus der Ontologie eine mögliche Abstraktion auf der Ebene der Klassen der Entitäten auswerten zu können, werden zu dieser Menge zusätzlich die Klassen der Entitäten ergänzt. Dazu wird die Funktion auf Definition 3.4.1 verwendet. Die Klassen beziehen sich dabei auf die zugrundeliegende Ontologie, welche je nach Anwendungsfall definiert werden kann.

**Definition 3.4.1** (Klasse\_von). Die Funktion

$\text{Klasse\_von}(x)$

angewandt auf einen Entitätsbezeichner  $x$  eines Kritikalitätsphänomens, gibt die  $x$  zugeordnete Klasse der Ontologie zurück.

Für die Menge ergibt sich damit Folgendes:

$$\text{Ent}_{A \times B, K} := \{(a, b), K_a, K_b \mid (a, b) \in \text{Ent}_{A \times B}, K_a = \text{Klasse\_von}(a), K_b = \text{Klasse\_von}(b)\} \quad (3.2)$$

Mittels dieser Menge kann nun geprüft werden, welche Entitätspaare eine weitere Analyse der Abstraktions-Relation  $\sqsubseteq_{\text{abs}}$  ermöglichen. Dabei ist darauf zu achten, dass für  $A \sqsubseteq_{\text{abs}} B$  eine injektive Abbildung der Entitäten des Kritikalitätsphänomens A auf die Entitäten des Kritikalitätsphänomens B abbildet, da sonst entweder eine konkretisierte Entität oder eine erhöhte Stelligkeit in A vorliegt. Beides sind Anzeichen dafür, dass entweder  $B \sqsubseteq_{\text{abs}} A$  gilt, oder keine Abstraktionsrelation zwischen A und B gilt. Es gilt also:

$$\text{Ent}_A \sqsubseteq_{\text{abs}} \text{Ent}_B \Leftrightarrow \exists \text{ inj. Abb. } f : \text{Ent}_A \rightarrow \text{Ent}_B : \forall a \in \text{Ent}_A : K_a \sqsubseteq K_{f(a)}$$

Es kann auch der Fall sein, dass mehrere dieser Abbildungen zwischen zwei Kritikalitätsphänomenen existieren. Die Menge dieser Abbildungen wird im folgenden mit  $F_{\text{Ent}}$  bezeichnet, sodass gilt:

$$F_{\text{Ent}_{A,B}} := \{f : \text{Ent}_A \rightarrow \text{Ent}_B \mid \forall a \in \text{Ent}_A : K_a \sqsupseteq K_{f(a)}, \forall a_1, a_2 \in \text{Ent}_A : f(a_1) = f(a_2) \Rightarrow a_1 = a_2\} \quad (3.3)$$

### Beispiel

Betrachtet werden zwei Kritikalitätsphänomene A = 'Überholen eines LKW' und B='Überholen eines LKWs und eines Fahrradfahrers'. Einige der im Folgenden zu betrachtenden Mengen sind intuitiv erkennbar (vgl. Fahrradfahrer). Eine ein wenig verstecktere Entität ist die des überholenden Fahrzeugs, deren Existenz durch das Verb 'überholen' indirekt vorgegeben wird. Außerdem wird angenommen, dass die Fahrzeuge auf Fahrstreifen fahren, sodass diese ebenfalls zu den Entitäten zählen. Diese Angabe ist gerade für die räumlichen Aussagen relevant.

Mit passend gewählten Bezeichnern für die entsprechenden Entitäten ergeben sich die folgenden Mengen für diese Phänomene:

- $\text{Ent}_A = \{fz_A, lkw_A, \text{FahrstreifenLinks}_A, \text{FahrstreifenRechts}_B\}$
- $\text{Ent}_B = \{fz_B, lkw_B, rad_B, \text{FahrstreifenLinks}_A, \text{FahrstreifenRechts}_B\}$

Aus diesen Kritikalitätsphänomen spezifischen Mengen ergeben sich für die Analyse für die nach Gleichung 3.1 und Gleichung 3.2 definierten Mengen:

- $\text{Ent}_{\sqsupseteq_{\text{abs}}} = \{(fz_A, fz_B), (fz_A, lkw_B), (fz_A, rad_B), (fz_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), (fz_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), (lkw_A, fz_B), (lkw_A, lkw_B), (lkw_A, rad_B), (lkw_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), (lkw_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), (\text{FahrstreifenLinks}_A, fz_B), (\text{FahrstreifenLinks}_A, lkw_B), (\text{FahrstreifenLinks}_A, rad_B), (\text{FahrstreifenLinks}_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), (\text{FahrstreifenLinks}_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), (\text{FahrstreifenRechts}_A, fz_B), (\text{FahrstreifenRechts}_A, lkw_B), (\text{FahrstreifenRechts}_A, rad_B), (\text{FahrstreifenRechts}_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), (\text{FahrstreifenRechts}_A, \text{FahrstreifenRechts}_B)\}$
- $\text{Klassen}_{\text{Ent}_{\sqsupseteq_{\text{abs}}}} = \{((fz_A, fz_B), \text{Fahrzeug}, \text{Fahrzeug}), ((fz_A, lkw_B), \text{Fahrzeug}, \text{LKW}), ((fz_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), \text{Fahrzeug}, \text{Fahrstreifen}), ((fz_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), \text{Fahrzeug}, \text{Fahrstreifen}), ((fz_A, rad_B), \text{Fahrzeug}, \text{Radfahrer}), ((lkw_A, fz_B), \text{LKW}, \text{Fahrzeug}), ((lkw_A, lkw_B), \text{LKW}, \text{LKW}), ((lkw_A, rad_B), \text{LKW}, \text{Radfahrer}), (lkw_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), \text{LKW}, \text{Fahrstreifen}), (lkw_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), \text{LKW}, \text{Fahrstreifen}), ((\text{FahrstreifenLinks}_A, fz_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Fahrzeug}), ((\text{FahrstreifenLinks}_A, lkw_B), \text{Fahrstreifen}, \text{LKW}), ((\text{FahrstreifenLinks}_A, rad_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Radfahrer}), (\text{FahrstreifenLinks}_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Fahrstreifen}), ((\text{FahrstreifenLinks}_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Fahrstreifen}), ((\text{FahrstreifenRechts}_A, fz_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Fahrzeug}), ((\text{FahrstreifenRechts}_A, lkw_B), \text{Fahrstreifen}, \text{LKW}), ((\text{FahrstreifenRechts}_A, rad_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Radfahrer}), (\text{FahrstreifenRechts}_A, \text{FahrstreifenLinks}_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Fahrstreifen}), ((\text{FahrstreifenRechts}_A, \text{FahrstreifenRechts}_B), \text{Fahrstreifen}, \text{Fahrstreifen})\}$

An diesen Paaren lässt sich überprüfen, ob  $K_a \sqsupseteq K_b$  gilt. Anschließend kann ermittelt werden, ob eine Abbildung  $f \in F_{Ent}$  existiert. Es ergibt sich die folgende Menge, die zwei Abbildungen enthält:

$$F_{Ent_{A,B}} = \{ \{ (fz_A, fz_B), (lkw_A, lkw_B), (FahrstreifenRechts_A, FahrstreifenRechts_B), \\ (FahrstreifenLinks_A, FahrstreifenLinks_B) \}, \{ (fz_A, fz_B), (lkw_A, lkw_B), \\ (FahrstreifenRechts_A, FahrstreifenLinks_B), (FahrstreifenLinks_A, FahrstreifenRechts_B) \} \}$$

Jede andere Abbildung wäre nicht zulässig, da entweder die Hierarchie der Ontologie nicht beachtet würde oder nicht alle Entitäten des Kritikalitätsphänomens A abgebildet würden.

Der Unterschied zwischen den Abbildungen liegt nur in den Zuordnungen der Fahrstreifen. Mit Expertenwissen ist offensichtlich, dass nur die erste Abbildung erfolgsversprechend ist. Eine automatisierte Analyse würde dies erst in einem späteren Schritt erkennen.

### 3.4.2.2 2. Schritt: Analyse der Abstraktions-Relation $\sqsupseteq_{abs}$ auf Raumebene

Auf Basis der Abbildungen aus  $F_{Ent}$  kann die Analyse auf der räumlichen Ebene fortgesetzt werden. Dafür werden die Abbildungen in jede mögliche Kombination der räumlichen Aussagen eingesetzt. Dies geschieht durch Ersetzen der entsprechenden Entitäten durch ihren Funktionswert.

Mit der Gleichsetzung wird geprüft, ob es eine Lösung für die Kombination der Abschnitte gibt.

Der generelle Aufbau von  $r_{A,i}$  und  $r_{B,j}$  ist in Definition 3.3.2 erläutert.  $A$  und  $B$  bezeichnen die Kritikalitätsphänomene,  $i$  und  $j$  das Intervall, in dem die räumlichen Aussagen gelten. Da diese Intervalle nicht die gleiche Nummerierung haben müssen, werden zwei verschiedene Variablen verwendet.

$$r_{A,i} \sqsupseteq_{abs} r_{B,j} :\Leftrightarrow \exists f \in F_{Ent} : r_{A,i}(Ent_A)[Ent_A \setminus f(Ent_A)] \wedge r_{B,j}(Ent_B) \quad (3.4)$$

#### Beispiel

Es gelten die Annahmen des letzten Beispiels. Es wird zudem davon ausgegangen, dass das Überholen in fünf Intervallen  $i1, \dots, i5$  abgebildet werden kann:

- i1 Annähern an die zu überholende(n) Entität(en)
- i2 Fahrstreifenwechsel
- i3 Fahren auf dem Fahrstreifen neben der (den) zu überholenden Entität(en)
- i4 Fahrstreifenwechsel
- i5 Entfernen von der (den) überholten Entität(en)

Da die Betrachtung all dieser Intervalle den Rahmen sprengen würde, wird in diesem Beispiel nur auf die räumlichen Aussagen des dritten Intervalls eingegangen.

Diese sind für das Kritikalitätsphänomen A wie folgt:

$$\begin{aligned} & fz_A \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_A \wedge lkw_A \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_A \wedge lkw_A \text{ DC } fz_A \\ & \wedge \text{FahrstreifenLinks}_A \text{ EC FahrstreifenRechts}_A \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_A, lkw_A: fz_A) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_A, lkw_A: fz_A) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_A, lkw_A: fz_A) ) \\ & \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_A, lkw_A: \text{FahrstreifenLinks}_A) \end{aligned}$$

Für das Kritikalitätsphänomen B gelten ähnliche Raumaussagen für das dritte Intervall. Diese werden ergänzt um die Existenz eines Fahrradfahrers, dessen Position rechts von der des Fahrzeugs und für genug Abstand auch auf einem anderen Fahrstreifen angenommen wird, sonst jedoch nicht weiter spezifiziert ist. Daraus ergibt sich folgende räumliche Aussage:

$$\begin{aligned} & fz_B \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \wedge lkw_B \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge lkw_B \text{ DC } fz_B \\ & \wedge \text{FahrstreifenLinks}_B \text{ EC FahrstreifenRechts}_B \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) ) \\ & \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: \text{FahrstreifenLinks}_B) \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) ) \end{aligned}$$

Sollen diese räumlichen Aussagen nun miteinander verglichen werden, so werden die Entitätsbezeichner, die in den Aussagen referenziert werden, durch die Entitäten ersetzt werden, auf die eine der zuvor ermittelten Abbildungen sie abbildet. Das wird für jede Abbildung, in diesem Fall folglich für zwei Abbildungen, durchgeführt. Daraus ergeben sich die folgenden, zu überprüfenden Aussagen:

$$\begin{aligned} & fz_B \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \wedge lkw_B \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge lkw_B \text{ DC } fz_B \\ & \wedge \text{FahrstreifenLinks}_B \text{ EC FahrstreifenRechts}_B \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) ) \\ & \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: \text{FahrstreifenLinks}_B) \\ & \wedge \\ & fz_B \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \wedge lkw_B \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge lkw_B \text{ DC } fz_B \\ & \wedge \text{FahrstreifenLinks}_B \text{ EC FahrstreifenRechts}_B \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) ) \\ & \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: \text{FahrstreifenLinks}_B) \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) ) \end{aligned}$$

Dadurch, dass bis auf die Aussagen über den Radfahrer die räumlichen Aussagen beider Kritikalitätsphänomene gleich sind, lässt sich die Formel wie folgt kürzen:

$$\begin{aligned} & fz_B \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \wedge lkw_B \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge lkw_B \text{ DC } fz_B \\ & \wedge \text{FahrstreifenLinks}_B \text{ EC FahrstreifenRechts}_B \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: fz_B) ) \\ & \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, lkw_B: \text{FahrstreifenLinks}_B) \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) \vee \\ & \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, rad_B: fz_B) ) \end{aligned}$$

Diese Aussage entspricht nun der Aussage des Kritikalitätsphänomens B. Da angenommen werden kann, dass die räumlichen Aussagen der beiden Kritikalitätsphänomene gültig sind, ist damit auch die Aussage über beide räumlichen Aussagen der dritten Intervalle der Kritikalitätsphänomene erfüllbar.

Da sich die Nutzung dieser Abbildung aus  $F_{Ent_{A,B}}$  auf der zeitlichen Ebene noch als falsch herausstellen kann, wird so nun auch für die zweite Abbildung verfahren:

$$\begin{aligned}
& f_{z_B} \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge l_{k_{w_B}} \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \wedge l_{k_{w_B}} \text{ DC } f_{z_B} \\
& \wedge \text{ FahrstreifenRechts}_B \text{ EC FahrstreifenLinks}_B \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenLinks}_B, l_{k_{w_B}}: f_{z_B}) \vee \\
& \text{lc}(\text{FahrstreifenLinks}_B, l_{k_{w_B}}: f_{z_B}) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenLinks}_B, l_{k_{w_B}}: f_{z_B}) ) \\
& \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenLinks}_B, l_{k_{w_B}}: \text{FahrstreifenRechts}_B) \\
& \wedge \\
& f_{z_B} \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \wedge l_{k_{w_B}} \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge l_{k_{w_B}} \text{ DC } f_{z_B} \\
& \wedge \text{ FahrstreifenLinks}_B \text{ EC FahrstreifenRechts}_B \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, l_{k_{w_B}}: f_{z_B}) \vee \\
& \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, l_{k_{w_B}}: f_{z_B}) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, l_{k_{w_B}}: f_{z_B}) ) \\
& \wedge \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, l_{k_{w_B}}: \text{FahrstreifenLinks}_B) \wedge ( \text{ll}(\text{FahrstreifenRechts}_B, r_{d_B}: f_{z_B}) \vee \\
& \text{lc}(\text{FahrstreifenRechts}_B, r_{d_B}: f_{z_B}) \vee \text{lp}(\text{FahrstreifenRechts}_B, r_{d_B}: f_{z_B}) )
\end{aligned}$$

Die räumlichen Aussagen, die durch Substitution mittels der zweiten Abbildung entstehen sind nicht erfüllbar. Dies ergibt sich bereits aus der Verundung folgender Aussagen:

$$\begin{aligned}
& f_{z_B} \text{ NTTP FahrstreifenRechts}_B \wedge f_{z_B} \text{ NTTP FahrstreifenLinks}_B \\
& \wedge \text{ FahrstreifenRechts}_B \text{ EC FahrstreifenLinks}_B
\end{aligned}$$

Ein Fahrzeug kann nicht gleichzeitig räumlich innerhalb (ohne Randberührung) von zwei verschiedenen Fahrstreifen liegen, wenn diese nur am Rand verbunden sind.

Für eine komplette Durchführung dieses Schritts wird in dieser Form für alle Kombinationen der räumlichen Aussagen für die Intervalle verfahren.

### 3.4.2.3 3. Schritt: Analyse der Abstraktions-Relation $\sqsubseteq_{\text{abs}}$ auf Zeitebene

Im letzten Schritt der Analyse werden die zuvor ermittelten Abbildungen auf der zeitlichen Ebene geprüft. Hierbei ist relevant, dass die zeitlichen Abläufe beider Kritikalitätsphänomene erfüllbar sein müssen. Für die ermittelten Intervalle wird für alle Abstraktionen geprüft, ob die jeweiligen, durch die Abbildung bezeichneten Paare bei Gleichsetzung der Intervalle beide zeitlichen Abläufe erfüllen.

Gibt es eine solche Abbildung, gilt die Abstraktion auf der zeitlichen Ebene. Auch hier sind  $r_{A,i}$  und  $r_{B,j}$  aus Definition 3.3.2,  $A$  und  $B$  bezeichnen die Kritikalitätsphänomene,  $i$  und  $j$  das entsprechende Intervall, für das die Raumaussagen gelten. Der Aufbau von  $I_A$  und  $I_B$  ist ebenfalls in Definition 3.3.2 zu finden.  $p_A$  und  $p_B$  bezeichnen die großen Intervalle der Kritikalitätsphänomene A und B, die den gesamten Zeitraum, in dem das Kritikalitätsphänomen vor sich geht, beschreiben. Die Bezeichner

zwischen den Intervallen stammen aus ATL und sind in Tabelle 2.1 angegeben und erläutert.  $f$  ist eine Funktion aus  $F_{\text{Ent}_{A,B}}$  (vgl. Unterunterabschnitt 3.4.2.1). Damit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_A \sqsubseteq_{\text{abs}} \mathbf{I}_B &: \Leftrightarrow & (3.5) \\ (\forall r_{A,i}, r_{B,j} : & (\neg r_{A,i}(g(\text{Ent}_A))|_g \wedge r_{B,j}(\text{Ent}_B) \Rightarrow i B|BI|M|MI j) \\ \wedge (r_{A,i}(g(\text{Ent}_A))|_g & \wedge r_{B,j}(\text{Ent}_B) \Rightarrow i B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI j)) \\ \wedge (p_A E|D|DI|S|SI|F|FI & p_B) \end{aligned}$$

Da es sich hierbei um den letzten Schritt der Analyse handelt, liegt bei Erfüllung dieser letzten Formel auch eine Abstraktion zwischen den Kritikalitätsphänomenen vor. Es gilt somit:

$$A \sqsubseteq_{\text{abs}} B : \Leftrightarrow \mathbf{I}_A \sqsubseteq_{\text{abs}} \mathbf{I}_B \quad (3.6)$$

### Beispiel

Auch für die Demonstration dieses Schritts werden die Ergebnisse der zuvor angebrachten Beispiele zusammen mit den Erläuterungen der beiden Kritikalitätsphänomene A und B angenommen.

Für die zeitliche Ebene wird nun zudem eine nähere Definition der zeitlichen Abläufe benötigt. Es werden im Folgenden die Benennungen die Intervalle  $i1, \dots, i5$  aus dem vorherigen Beispiel verwendet. Für das Kritikalitätsphänomen A wird dazu der folgende Ablauf angenommen:

$$\begin{aligned} & \text{Meets}(i1, i2) \wedge \text{Meets}(i2, i3) \wedge \text{Meets}(i3, i4) \wedge \text{Meets}(i4, i5) \\ & \wedge \text{Starts}(i1, a) \wedge \text{During}(i2, a) \wedge \text{During}(i3, a) \wedge \text{During}(i4, a) \wedge \text{Finishes}(i5, a) \end{aligned}$$

Wie zu erkennen ist, handelt es sich dabei um eine Sequenz ohne Parallelität. Für das zweite Kritikalitätsphänomen B können zwei weitere Intervalle angenommen werden:

j6 Überholen des LKW

j7 Überholen des Fahrradfahrers

Für diese kann kein genauer Ablauf angegeben werden, da nicht definiert ist, ob zuerst der Radfahrer oder der LKW überholt wird. Beide Intervalle können jedoch in der zeitlichen Sequenz dem Zeitraum zugeschrieben werden, in dem das Fahrzeug überholt. Für das Kritikalitätsphänomen B ergibt sich damit der folgende zeitliche Ablauf:

$$\begin{aligned} & \text{Meets}(j1, j2) \wedge \text{Meets}(j2, j3) \wedge \text{Meets}(j3, j4) \wedge \text{Meets}(j4, j5) \wedge \text{During}(j6, j3) \wedge \text{During}(j7, j3) \\ & \wedge \text{Starts}(j1, b) \wedge \text{During}(j2, b) \wedge \text{During}(j3, b) \wedge \text{During}(j4, b) \wedge \text{During}(j5, b) \\ & \wedge \text{During}(j6, b) \wedge \text{Finishes}(j7, b) \end{aligned}$$

Für die Analyse der räumlichen Aussagen kann angenommen werden, dass für die zweite Abbildung keine der Intervall-Kombination gültig ist. Die Begründung des vorherigen Beispiels greift auch für

alle weiteren Kombinationen. Es gibt daher keine Kombination, in der Gleichung 3.4 gültig ist. Für die zweite Abbildung gilt damit nach Gleichung 3.5 folgende Aussage:

$$\begin{aligned}
& \text{Meets}(i1, i2) \wedge \text{Meets}(i2, i3) \wedge \text{Meets}(i3, i4) \wedge \text{Meets}(i4, i5) \\
& \wedge \text{Starts}(i1, a) \wedge \text{During}(i2, a) \wedge \text{During}(i3, a) \wedge \text{During}(i4, a) \wedge \text{Finishes}(i5, a) \\
& \wedge \\
& \text{Meets}(j1, j2) \wedge \text{Meets}(j2, j3) \wedge \text{Meets}(j3, j4) \wedge \text{Meets}(j4, j5) \wedge \text{During}(j6, j3) \\
& \wedge \text{During}(j7, j3) \wedge \text{Starts}(j1, b) \wedge \text{During}(j2, b) \wedge \text{During}(j3, b) \wedge \text{During}(j4, b) \wedge \text{During}(j5, b) \\
& \wedge \text{During}(j6, b) \wedge \text{Finishes}(j7, b) \\
& \wedge \\
& (i1 B|BI|M|MI j1) \wedge (i1 B|BI|M|MI j2) \wedge (i1 B|BI|M|MI j3) \wedge (i1 B|BI|M|MI j4) \\
& \wedge (i1 B|BI|M|MI j5) \wedge (i1 B|BI|M|MI j6) \wedge (i1 B|BI|M|MI j7) \wedge (i2 B|BI|M|MI j1) \\
& \wedge (i2 B|BI|M|MI j2) \wedge (i2 B|BI|M|MI j3) \wedge (i2 B|BI|M|MI j4) \wedge (i2 B|BI|M|MI j5) \\
& \wedge (i2 B|BI|M|MI j6) \wedge (i2 B|BI|M|MI j7) \wedge (i3 B|BI|M|MI j1) \wedge (i3 B|BI|M|MI j2) \\
& \wedge (i3 B|BI|M|MI j3) \wedge (i3 B|BI|M|MI j4) \wedge (i3 B|BI|M|MI j5) \wedge (i3 B|BI|M|MI j6) \\
& \wedge (i3 B|BI|M|MI j7) \wedge (i4 B|BI|M|MI j1) \wedge (i4 B|BI|M|MI j2) \wedge (i4 B|BI|M|MI j3) \\
& \wedge (i4 B|BI|M|MI j4) \wedge (i4 B|BI|M|MI j5) \wedge (i4 B|BI|M|MI j6) \wedge (i4 B|BI|M|MI j7) \\
& \wedge (i5 B|BI|M|MI j1) \wedge (i5 B|BI|M|MI j2) \wedge (i5 B|BI|M|MI j3) \wedge (i5 B|BI|M|MI j4) \\
& \wedge (i5 B|BI|M|MI j5) \wedge (i5 B|BI|M|MI j6) \wedge (i5 B|BI|M|MI j7) \\
& \wedge a E|D|DI|S|SI|F|FI b
\end{aligned}$$

Diese zeitliche Aussage gilt nicht. Es gibt keine Möglichkeit alle Aussagen zu erfüllen, wenn keines der Intervalle der Kritikalitätsphänomene zeitgleich zu einem Intervall des anderen Kritikalitätsphänomens liegen kann.

Für die erste Abbildung liegt ein anderer Sachverhalt vor. Hier gibt es fünf Intervalle, deren räumliche Aussagen gemeinsam gelten können. Daher werden für diese Kombinationen auch Operatoren für

paralleles Zeitverhalten angegeben. Die veränderten Zeilen sind in der folgenden zeitlichen Aussage markiert:

$$\begin{aligned}
& \text{Meets}(i1, i2) \wedge \text{Meets}(i2, i3) \wedge \text{Meets}(i3, i4) \wedge \text{Meets}(i4, i5) \\
& \wedge \text{Starts}(i1, a) \wedge \text{During}(i2, a) \wedge \text{During}(i3, a) \wedge \text{During}(i4, a) \wedge \text{Finishes}(i5, a) \\
& \wedge \\
& \text{Meets}(j1, j2) \wedge \text{Meets}(j2, j3) \wedge \text{Meets}(j3, j4) \wedge \text{Meets}(j4, j5) \wedge \text{During}(j6, j3) \\
& \wedge \text{During}(j7, j3) \wedge \text{Starts}(j1, b) \wedge \text{During}(j2, b) \wedge \text{During}(j3, b) \wedge \text{During}(j4, b) \wedge \text{During}(j5, b) \\
& \wedge \text{During}(j6, b) \wedge \text{Finishes}(j7, b) \\
& \wedge \\
& (\mathbf{i1\ B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI\ j1}) \wedge (i1\ B|BI|M|MI\ j2) \wedge (i1\ B|BI|M|MI\ j3) \\
& \wedge (i1\ B|BI|M|MI\ j4) \wedge (i1\ B|BI|M|MI\ j5) \wedge (i1\ B|BI|M|MI\ j6) \wedge (i1\ B|BI|M|MI\ j7) \\
& \wedge (i2\ B|BI|M|MI\ j1) \wedge (\mathbf{i2\ B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI\ j2}) \wedge (i2\ B|BI|M|MI\ j3) \\
& \wedge (i2\ B|BI|M|MI\ j4) \wedge (i2\ B|BI|M|MI\ j5) \wedge (i2\ B|BI|M|MI\ j6) \wedge (i2\ B|BI|M|MI\ j7) \\
& \wedge (i3\ B|BI|M|MI\ j1) \wedge (i3\ B|BI|M|MI\ j2) \wedge (\mathbf{i3\ B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI\ j3}) \\
& \wedge (i3\ B|BI|M|MI\ j4) \wedge (i3\ B|BI|M|MI\ j5) \wedge (i3\ B|BI|M|MI\ j6) \wedge (i3\ B|BI|M|MI\ j7) \\
& \wedge (i4\ B|BI|M|MI\ j1) \wedge (i4\ B|BI|M|MI\ j2) \wedge (i4\ B|BI|M|MI\ j3) \\
& \wedge (\mathbf{i4\ B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI\ j4}) \wedge (i4\ B|BI|M|MI\ j5) \wedge (i4\ B|BI|M|MI\ j6) \\
& \wedge (i4\ B|BI|M|MI\ j7) \wedge (i5\ B|BI|M|MI\ j1) \wedge (i5\ B|BI|M|MI\ j2) \wedge (i5\ B|BI|M|MI\ j3) \\
& \wedge (i5\ B|BI|M|MI\ j4) \wedge (\mathbf{i5\ B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI\ j5}) \wedge (i5\ B|BI|M|MI\ j6) \\
& \wedge (i5\ B|BI|M|MI\ j7) \wedge a\ E|D|DI|S|SI|F|FI\ b
\end{aligned}$$

Diese Aussage ist erfüllbar. Damit ergibt sich, dass Überholen eines LKW eine Abstraktion von Überholen eines LKW und eines Radfahrers ist.

#### 3.4.2.4 Kein Ergebnis bei der Analyse der Abstraktions-Relation $\sqsupseteq_{\text{abs}}$

Da die in dieser Arbeit verwendeten Kalküle innerhalb der Analyse ein sogenanntes „don't know“ ausgeben können, muss dieser Fall auch in der Analyse betrachtet werden. Dieser Fall tritt dann auf, wenn das entsprechende Analyse-Werkzeug nicht genug Informationen hat, um eine Aussage zu treffen (z. B. wenn in der Ontologie nicht definiert ist, ob die Klassen gleich sein können).

Tritt ein solches Ergebnis bei der Analyse einer der drei Ebenen auf (und es gibt keine weitere, prüfbare Abbildung in  $F_{\text{Ent}_{A,B}}$ ), so kann für die Abstraktionsrelation zwischen den beiden Kritikalitätsphänomenen keine Aussage getroffen werden.

#### 3.4.3 Analyse der Konkretisierungsrelation

Für die Analyse von Konkretisierungsrelationen zwischen zwei Kritikalitätsphänomenen kann die Verknüpfung der beiden Relationen ausgenutzt werden:

Die Konkretisierungsrelation ist die Umkehrrelation der Abstraktionsrelation.

Dabei gilt, dass eine Konkretisierung zwischen zwei Kritikalitätsphänomenen in inverser Richtung einer Abstraktionsrelation zwischen ihnen vorliegt. Somit lassen sich Konkretisierungen genau dann feststellen, wenn eine Abstraktion festgestellt wurde. Es gilt somit:

$$B \sqsubseteq_{\text{kon}} A \Leftrightarrow A \sqsubseteq_{\text{abs}} B$$

Aufgrund der Tatsache, dass Konkretisierungen und Abstraktionen von Kritikalitätsphänomenen nicht eindeutig sind, kann die Inverse der Abstraktion nicht eindeutig benannt werden. Somit gilt zwar immer, dass bei einer Abstraktion in umgekehrter Richtung zwischen diesen Phänomenen eine Konkretisierung vorliegt, eine Konkretisierung des übergeordneten Kritikalitätsphänomens kann jedoch auch zu einem anderen Kritikalitätsphänomen führen.

## 4 Exemplarische Umsetzung des Formalisierungsprozesses

### 4.1 Kritikalitätsphänomendatenbank des DLR

Für die folgende Umsetzung der Analyse wurde eine Datenbank mit bereits formulierten Kritikalitätsphänomenen verwendet, die im Institut DLR SE von der Gruppe System Concepts and Design Methods entwickelt und aufgebaut wurde. In dieser Datenbank sind zum Zeitpunkt des Exports der Kritikalitätsphänomene (Dezember 2021) für die Arbeit 238 Kritikalitätsphänomene formuliert. Als Programm wurde für die strukturierte Darstellung der Relationen zwischen den Kritikalitätsphänomenen Neo4j verwendet.

#### Neo4j

Neo4j ist eine Graphdatenbank und damit spezialisiert auf Daten, die viele Verbindungen untereinander aufweisen. Diese werden innerhalb einer Graphdatenbank anstelle von Tabelleneinträgen explizit als Relationen notiert. Somit können Daten, welche mit vielen anderen Einträgen in Verbindung stehen, effizienter abgefragt werden [Mil13].

Die Datenstruktur basiert dabei, wie der Name „Graphdatenbank“ bereits impliziert, auf einer Graphstruktur. Ein Beispiel einer solchen Struktur ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Daten werden dabei als Knoten und Relationen als Kanten des Graphen abgebildet.

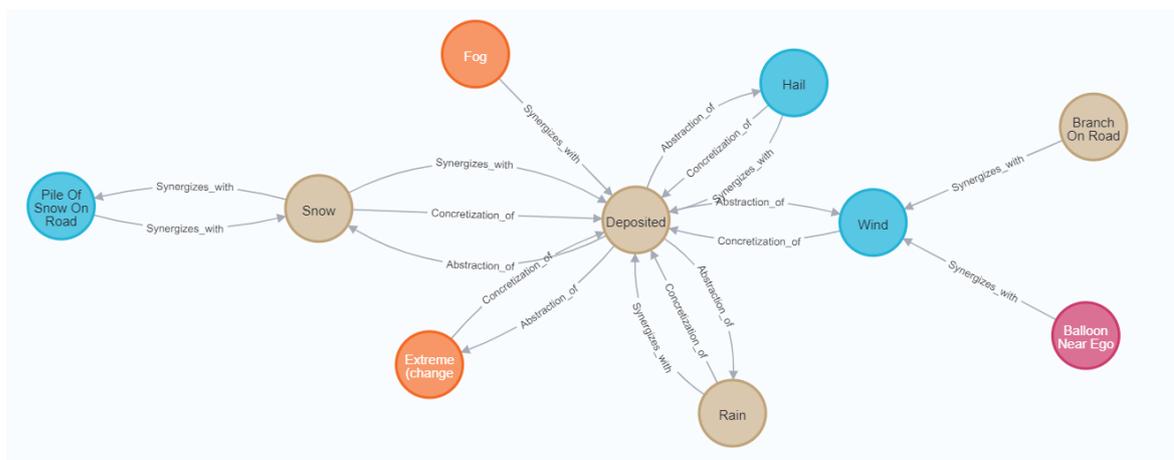


Abbildung 4.1: Darstellung von Kritikalitätsphänomenen als Knoten und ihrer Relationen als Kanten einer Graphstruktur in Neo4j.

## 4.2 Untersuchung von Begriffen in formulierten Kritikalitätsphänomenen

Um ein fundiertes Verständnis der Auswirkungen verschiedener Wörter und Begriffe auf das formulierte Kritikalitätsphänomen zu erhalten, wurden die natürlich sprachlichen Formulierungen von bereits formulierten Kritikalitätsphänomenen der in Abschnitt 4.1 erwähnten Datenbank analysiert.

Dabei ergab sich die Aufteilung, die in Tabelle A.1 zu sehen ist. Für die Formalisierung nicht notwendige Wörter, wie *der* oder *eines* wurden nicht beachtet. *Eines* impliziert zwar eine Quantifizierung, die jedoch bereits durch Benennung der jeweiligen Entität und das Fehlen von verändernden Quantifizierungen wie *mehrere* oder *kein* impliziert wird.

Daraus ergibt sich die in Abbildung 4.2 dargestellte Aufteilung der Gesamtzahl der Worte in Substantive, Adjektive, Präpositionen und Verben.

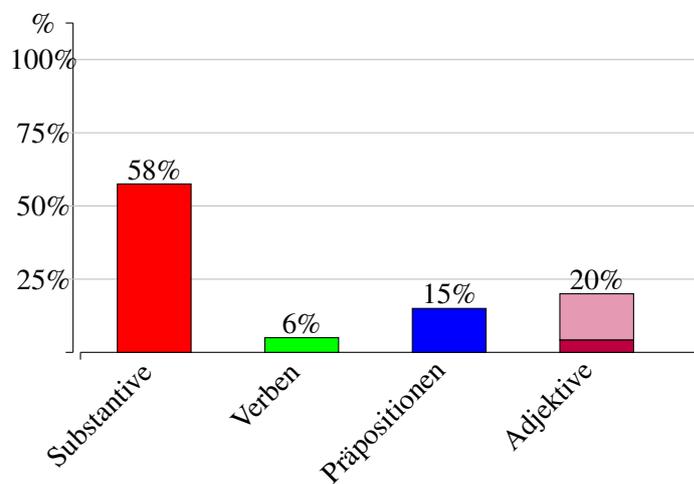


Abbildung 4.2: Aufteilung der Worte aus Tabelle A.1 nach Wortarten

Ein solch umfangreiches Vokabular ist für die Nutzung in einer Formalisierung wenig vorteilhaft, da jeder Begriff in der Formalisierung definiert sein muss. Ein sogenanntes kontrolliertes Vokabular mit möglichst wenig Worten ist also von Vorteil. Ein kontrolliertes Vokabular ist eine Liste von terminologischen Begriffen, die jeweils ein Konzept beschreiben [ISO13]. Dieses Konzept muss in der Formalisierung definiert und formal ausgedrückt werden.

Das ermittelte Vokabular lässt sich mittels Umformulierung verkleinern. Ein möglicher Ansatz dies zu tun ist das sogenannte „stemming“ (vgl. [Hul96; Jiv+11; Lov68]). Bei dieser Technik werden die Wortstämme der Wörter extrahiert, sodass Deklination und Konjugation sowie Genus der Wörter entfallen und somit aus der Gruppe der Wörter Dopplungen, die durch diese hervorgerufen wurden, entfernt.

Es gibt jedoch auch Wörter, die von dieser Methode nicht beeinflusst werden: So drücken beispielsweise „nahe“ und „in der Nähe“ gleiche Bedingungen aus und lassen sich daher durch einen der beiden Ausdrücke darstellen. Es ist nicht notwendig beide Begriffe in das kontrollierte Vokabular aufzunehmen.

### 4.3 Exemplarische Formalisierung einiger Kritikalitätsphänomene

Im folgenden Kapitel werden einige Kritikalitätsphänomene der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Datenbank in formaler Form angegeben. Diese Kritikalitätsphänomene wurden nach zeitlichen Aspekten sowie der Abbildung möglichst vieler Aspekte der Formalisierung ausgewählt.

#### 4.3.1 Links Abbiegen mit Gegenverkehr

Das erste Beispiel einer Formalisierung beschreibt das nach links Abbiegen eines Ego-Fahrzeugs  $e$  auf einer Kreuzung  $k$  (genauer von Fahrstreifen  $x$  der Kreuzung über das Verbindungsstück  $y$  auf den Fahrstreifen  $z$  der Kreuzung), während ein anderes Fahrzeug  $f$  diesem (von Fahrstreifen  $g$  kommend) entgegen kommt.

Zeitlich ist dieses Kritikalitätsphänomen in sechs Zeitintervalle eingeteilt:

- $i_1$ : Ego nähert sich der Kreuzung
- $i_2$ : Ego befindet sich auf der Kreuzung (genauer: auf dem Verbindungsstück  $y$ )
- $i_3$ : Ego verlässt die Kreuzung
- $i_4$ : Fahrzeug  $f$  nähert sich der Kreuzung
- $i_5$ : Fahrzeug  $f$  befindet sich auf der Kreuzung
- $i_6$ : Fahrzeug  $f$  befindet sich nicht mehr auf der Kreuzung

Während die ersten drei und die letzten drei Intervalle direkt aufeinander folgen, wird für die Verbindung dieser Intervalle nur eine Annahme getroffen:

$f$  kommt dem Ego-Fahrzeug  $e$  entgegen, während dieses sich auf der Kreuzung befindet.

Hier könnte genauer spezifiziert werden, dass das Ego-Fahrzeug zu warten hat, bis Fahrzeug  $f$  die Kreuzung wieder verlassen hat. Dies wäre jedoch eher ein Detail der Implementierung als Bestandteil des Kritikalitätsphänomens.

Die räumlichen Gegebenheiten der Kreuzung wurden zur besseren Lesbarkeit aus den einzelnen Intervallen herausgezogen und im Hauptteil der Formel notiert. Der Kreuzungsaufbau folgt dem in Abschnitt 3.3.2.3 gegebenen Beispiel. In diesem Kritikalitätsphänomen wird jedoch ein weiterer Kreuzungsarm für den Gegenverkehr benötigt.

Gegenverkehr ist hier als geografisches Entgegenkommen definiert. Käme der Gegenverkehr von links oder rechts (z. B. bei einer abknickenden Vorfahrtsstraße) ergäbe sich eine andere Abfolge der Situation, da nicht auf die Kreuzung gefahren werden würde.

$$\begin{aligned}
& \exists e \in \text{Class} : \text{ego}, f \in \text{Class} : \text{Fahrzeug}, k \in \text{Class} : \text{Kreuzung}, x, z, g \in \text{Class} : \text{Streifen}, y \in \\
& \text{Class} : \text{Verbindung}, a, b, c \in \text{Class} : \text{Arm}, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, p_g \in I : \\
& b \text{DC} a \wedge c \text{DC} a \wedge c \text{DC} b \wedge a \text{EC} y \wedge b \text{EC} y \wedge c \text{EC} y \wedge a \text{TPP} k \wedge b \text{TPP} k \wedge c \text{TPP} k \wedge y \text{NTPP} k \wedge \\
& (\forall w \in \{a, b, c\} : (k \text{hat\_Arm } w)) \wedge k \text{hat\_Verbindung } y \wedge lp(a, y : b) \wedge sf(a, y : c) \wedge a \text{hat\_Streifen } x \wedge \\
& b \text{hat\_Streifen } z \wedge c \text{hat\_Streifen } g \\
& \wedge \text{Starts}(i_1, p_g) \wedge \text{During}(p_g, i_2) \wedge \text{During}(p_g, i_3) \wedge \text{During}(p_g, i_4) \wedge \text{During}(p_g, i_4) \wedge \text{Finishes}(i_6, p_g) \\
& \wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{During}(i_2, i_4) \wedge \text{Holds}(p_1, i_1) \wedge \text{Holds}(p_2, i_2) \wedge \text{Holds}(p_3, i_3) \wedge
\end{aligned}$$

$$\text{Holds}(p_4, i_4) \wedge \text{Meets}(i_4, i_5) \wedge \text{Meets}(i_5, i_6) \wedge \text{Holds}(p_5, i_5) \wedge \text{Holds}(p_6, i_6)$$

wobei

$$p_1 = e \text{ NTPP } x$$

$$p_2 = e \text{ NTPP } y$$

$$p_3 = e \text{ NTPP } z$$

$$p_4 = f \text{ NTPP } g$$

$$p_5 = f \text{ NTPP } y$$

$$p_6 = f \text{ DC } y$$

### 4.3.2 Unerwartetes Überqueren eines Zebrastreifens

Die unerwartete Überquerung eines Zebrastreifens durch einen Verkehrsteilnehmer kann durch verschiedene Vorgänge geschehen. Der erste ist, dass ein Verkehrsteilnehmer, der kein Fußgänger ist (also zum Beispiel ein nicht absteigender Radfahrer oder auch ein Rollstuhlfahrer) den Zebrastreifen überquert. Während ein Fahrradfahrer hier keine Vorfahrt hat (aber trotzdem z. T. so handelt, als ob er sie hätte), ist das Überqueren eines Zebrastreifens durch z. B. einen Rollstuhlfahrer selten genug, als dass es nicht der Norm entspricht. Die zweite Möglichkeit ist ein Umkehren des Fußgängers während der Überquerung. Die Formel zu diesem Kritikalitätsphänomen entspricht also einer ODER-Verknüpfung beider Szenarien.

Dabei entspricht die folgende Formel dem ersten Szenario:

$$\exists ego \in \text{Class} : \text{ego}, vt \in \text{Class} : \text{Verkehrsteilnehmer}, vt \notin \text{Class} : \text{Fussgaenger},$$

$$zs \in \text{Class} : \text{Zebrastreifen}, x, y \in \text{Class} : \text{Streifen}, s \in \text{Class} : \text{Strasse},$$

$$a, b \in \text{Class} : \text{Fahrbahnrand}, i_1, i_2, i_3, p_{z1} \in I :$$

$$a \neq b \wedge (\forall w \in \{a, b\} : (zs \text{ verbindet } w)) \wedge s \text{ hat\_Streifen } x, y \wedge zs \text{ NTPP } s \wedge (lp(x, zs : a) \vee rp(x, zs : a)) \wedge sf(x, zs : y)$$

$$\wedge \text{Starts}(i_1, p_{z1}) \wedge \text{During}(p_{z1}, i_2) \wedge \text{Finishes}(i_3, p_{z1})$$

$$\wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{Meets}(i_4, i_5) \wedge \text{During}(i_1, i_4) \wedge \text{During}(i_1, i_5) \wedge \text{Holds}(p_1, i_1) \wedge$$

$$\text{Holds}(p_2, i_2) \wedge \text{Holds}(p_3, i_3) \wedge \text{Holds}(p_4, i_4) \wedge \text{Holds}(p_5, i_5)$$

wobei

$$p_1 = ego \text{ NTPP } x$$

$$p_2 = ego \text{ NTPP } y$$

$$p_3 = vt \text{ NTPP } a$$

$$p_4 = vt \text{ NTPP } zs$$

$$p_5 = vt \text{ NTPP } b$$

Die Formel, die das zweite Szenario beschreibt, ist sehr ähnlich aufgebaut:

$$\exists ego \in \text{Class} : \text{ego}, fg \in \text{Class} : \text{Fussgaenger}, zs \in \text{Class} : \text{Zebrastreifen},$$

$$x, y \in \text{Class} : \text{Streifen}, s \in \text{Class} : \text{Strasse}, a, b \in \text{Class} : \text{Fahrbahnrand}, i_1, i_2, i_3, p_{z2} \in I :$$

$$a \neq b \wedge (\forall w \in \{a, b\} : (zs \text{ verbindet } w)) \wedge zs \text{ NTPP } s \wedge (lp(x, zs : a) \vee rp(x, zs : a)) \wedge sf(x, zs : y) \wedge s \text{ hat\_Streifen } x \wedge s \text{ hat\_Streifen } y$$

$$\wedge \text{Starts}(i_1, p_{z2}) \wedge \text{During}(p_{z2}, i_2) \wedge \text{Finishes}(i_3, p_{z2})$$

$$\wedge \text{Meets}(i_1, i_2) \wedge \text{Meets}(i_2, i_3) \wedge \text{Meets}(i_4, i_5) \wedge \text{During}(i_1, i_4) \wedge \text{During}(i_1, i_5) \wedge \text{Holds}(p_1, i_1) \wedge$$

$$\text{Holds}(p_2, i_2) \wedge \text{Holds}(p_3, i_3) \wedge \text{Holds}(p_4, i_4) \wedge \text{Holds}(p_5, i_5)$$

wobei

$$p_1 = \text{ego NTPP } x$$

$$p_2 = \text{ego NTPP } y$$

$$p_3 = \text{fg NTPP } a$$

$$p_4 = \text{fg NTPP } zs$$

$$p_5 = \text{fg NTPP } a$$

### 4.3.3 Unnötiges Langsamfahren

Für die Formalisierung dieses Kritikalitätsphänomens wird nur ein Intervall benötigt. Innerhalb dieses muss jedoch über alle möglichen Instanzen von triftigen Gründen argumentiert werden. Dies liegt daran, dass Langsamfahren mit einem triftigen Grund nicht als unnötig gilt. Was ein triftiger Grund ist, ist auch in der Straßenverkehrsordnung nur schwammig definiert. Diese Definition zu schärfen, ist nicht Teil dieser Arbeit. Für die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird angenommen, dass sie deutlich unter ( $\ll$ ) der Richtgeschwindigkeit des entsprechenden Straßenabschnitts liegt.

$$\exists fz \in \text{Class} : \text{Fahrzeug}, x \in \text{Class} : \text{Streifen}, s \in \text{Class} : \text{Strasse},$$

$$i_1, \text{lsf} \in I :$$

$$s \text{ hat\_Streifen } x,$$

$$\wedge \text{Equal}(i_1, \text{lsf}) \wedge \text{Holds}(p_1, i_1)$$

wobei

$$p_1 = \text{fz.Geschwindigkeit} \ll \text{s.Richtgeschwindigkeit} \wedge$$

$$\forall tg \in \text{Class} : \text{TriftigerGrund} : \neg \text{fz hat\_triftigen\_Grund } tg$$

## 4.4 Exemplarische Umsetzung der Analyse

Im folgenden Abschnitt wird eine exemplarische Umsetzung einer Analyse für vier Kritikalitätsphänomene beschrieben. Außerdem werden die verwendeten Werkzeuge näher vorgestellt und die Vorgehensweise erläutert.

### 4.4.1 Werkzeuge

Um die formalisierten Kritikalitätsphänomene zu analysieren, können bereits implementierte Werkzeuge für die einzelnen Logikformen genutzt werden.

In dieser Arbeit wurden dazu die folgenden Werkzeuge verwendet:

- qualreas (Werkzeug für ATL und RCC8, sowie weitere hier nicht benötigte Konzepte)
- Pellet (DL Inferenzwerkzeug)

Es fällt auf, dass kein Werkzeug für den *Double Cross Calculus* aufgeführt ist. Die Analyse dieser Teile ist noch ausstehend (vgl. Abschnitt 5.4). Dies liegt unter anderem an der höheren Komplexitätsklasse der Entscheidbarkeit von DCC (vgl. DCC: PSPACE ,Unterabschnitt 2.5.3 und RCC8: NP, Unterabschnitt 2.5.2) sowie der zeitlichen Limitierung dieser Arbeit.

Daher wurden für den Analyse-Teil der Arbeit die Aussagen, die in der Formalisierung aus Abschnitt 3.3 als Aussagen des DCC angegeben werden, hier direkt in der Ontologie angegeben.

So wird ein Kreuzungsarm einer Kreuzung nun innerhalb der Ontologie direkt als linker, vorderer, hinterer oder rechter Kreuzungsarm bezeichnet. Dies führt zu einer Konkretisierung der Situation, da in den Eigenschaften der Kreuzung festgelegt wird, über wie viele Arme diese verfügt und wie diese Arme zueinander angeordnet sind. Außerdem werden in der Ontologie weitere Eigenschaften benötigt.

Aus diesem Grund wird in der exemplarischen Umsetzung der Analyse in dieser Arbeit eine weitere, minimale Ontologie verwendet, die in Abbildung 4.3 dargestellt ist.

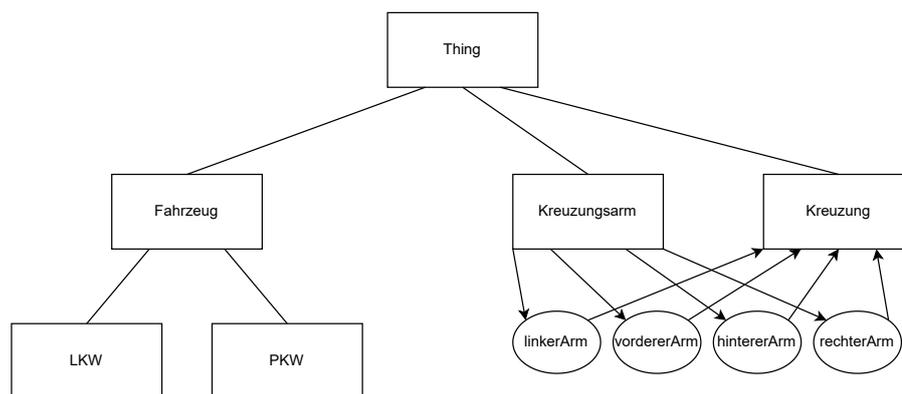


Abbildung 4.3: Minimale Ontologie für die exemplarische Umsetzung der Analyse. Nach OWL beschreibt Thing das universell erfüllte Konzept. Linien geben Hierarchien an, Pfeile Relationen, eckige Kästen Klassen und ovale Strukturen Namen der Relationen.

Diese Ontologie enthält nur die für die folgenden Kritikalitätsphänomene nötigen Klassen und die zugehörigen Eigenschaften und Relationen:

KP1 Rechtsabbiegen eines LKWs

KP2 Überfahren einer Kreuzung durch ein Fahrzeug

KP3 Rechtsabbiegen eines Fahrzeugs

KP4 Überfahren einer Kreuzung durch einen LKW

Diese können nach der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Formalisierung auch wie folgt notiert werden:

KP1  $\exists f_1 \in \text{Class:LKW}, k_1 \in \text{Class:Kreuzung}, i_{1,1}, i_{1,2}, i_{1,3}, p_1 \in I : \text{Starts}(i_{1,1}, p_1) \wedge$   
 $\text{During}(i_{1,2}, p_1) \wedge \text{Finishes}(i_{1,3}, p_1) \wedge \text{Meets}(i_{1,1}, i_{1,2}) \wedge \text{Meets}(i_{1,2}, i_{1,3}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_1\text{NTTP}k.\text{hintererArm}, i_{1,1}) \wedge \text{Holds}(f_1\text{NTTP}k.\text{Verbindung}, i_{1,2}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_1\text{NTTP}k.\text{rechterArm}, i_{1,3})$

KP2  $\exists f_2 \in \text{Class:Fahrzeug}, k_2 \in \text{Class:Kreuzung}, i_{2,1}, i_{2,2}, i_{2,3}, p_2 \in I : \text{Starts}(i_{2,1}, p_2) \wedge$   
 $\text{During}(i_{2,2}, p_2) \wedge \text{Finishes}(i_{2,3}, p_2) \wedge \text{Meets}(i_{2,1}, i_{2,2})$   
 $\wedge \text{Meets}(i_{2,2}, i_{2,3}) \wedge \text{Holds}(f_2\text{NTTP}k.\text{hintererArm}, i_{2,1}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_2\text{NTTP}k.\text{Verbindung}, i_{2,2}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_2\text{NTTP}k.\text{rechterArm} \vee f_2\text{NTTP}k.\text{linkerArm} \vee f_2\text{NTTP}k.\text{vordererArm}, i_{2,3})$

KP3  $\exists f_3 \in \text{Class:Fahrzeug}, k_3 \in \text{Class:Kreuzung}, i_{3,1}, i_{3,2}, i_{3,3}, p_3 \in I : \text{Starts}(i_{3,1}, p_3) \wedge$   
 $\text{During}(i_{3,2}, p_3) \wedge \text{Finishes}(i_{3,3}, p_3) \wedge \text{Meets}(i_{3,1}, i_{3,2}) \wedge \text{Meets}(i_{3,2}, i_{3,3}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_3\text{NTTP}k.\text{hintererArm}, i_{3,1}) \wedge \text{Holds}(f_3\text{NTTP}k.\text{Verbindung}, i_{3,2})$   
 $\wedge \text{Holds}(f_3\text{NTTP}k.\text{rechterArm}, i_{3,3})$

KP4  $\exists f_4 \in \text{Class:LKW}, k_4 \in \text{Class:Kreuzung}, i_{4,1}, i_{4,2}, i_{4,3}, p_4 \in I : \text{Starts}(i_{4,1}, p_4) \wedge$   
 $\text{During}(i_{4,2}, p_4) \wedge \text{Finishes}(i_{4,3}, p_4) \wedge \text{Meets}(i_{4,1}, i_{4,2}) \wedge$   
 $\text{Meets}(i_{4,2}, i_{4,3}) \wedge \text{Holds}(f_4\text{NTTP}k.\text{hintererArm}, i_{4,1}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_4\text{NTTP}k.\text{Verbindung}, i_{4,2}) \wedge$   
 $\text{Holds}(f_4\text{NTTP}k.\text{rechterArm} \vee f_4\text{NTTP}k.\text{linkerArm} \vee f_4\text{NTTP}k.\text{vordererArm}, i_{4,3})$

Die zwölf möglichen Abstraktionen zwischen diesen vier Kritikalitätsphänomenen sind der Übersicht halber in Abbildung 4.4 dargestellt. Zudem wurden die reflexiven Relationen nicht dargestellt. Diese sind jedoch trotzdem vorhanden und schon der Definition der Abstraktionsrelation nach erfüllt.

#### 4.4.2 Umsetzung des ersten Schritts der Analyse

Wie in Unterunterabschnitt 3.4.2.1 beschrieben, werden zunächst alle Entitäten, deren Existenz für das Auftreten der Kritikalitätsphänomene nötig sind, kombinatorisch verpaart. Es ergeben sich die in Tabelle 4.1 dargestellten Mengen.

Für diese Paare wird nun mittels Pellet überprüft, ob die Klasse der ersten Entität eine Abstraktion der Klasse der zweiten Entität des Tupels ist. Dabei ergeben sich die in Tabelle 4.2 dargestellten, übrigen Paare.

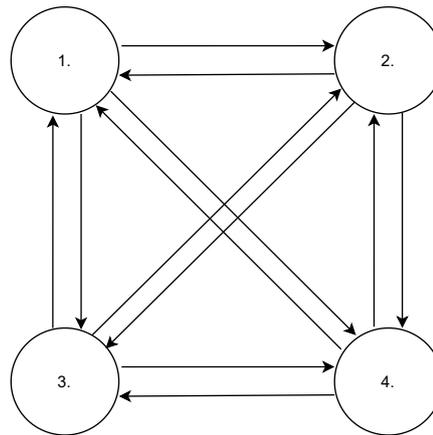


Abbildung 4.4: Mögliche Abstraktionen zwischen vier Kritikalitätsphänomene vor der Analyse.

Tabelle 4.1: Kombinatorische Entitätspaare für die exemplarische Analyse vierer Kritikalitätsphänomen

	KP1	KP2	KP3	KP4
KP1	$\{(f_1, f_1), (f_1, k_1), (k_1, f_1), (k_1, k_1)\}$	$\{(f_1, f_2), (f_1, k_2), (k_1, f_2), (k_1, k_2)\}$	$\{(f_1, f_3), (f_1, k_3), (k_1, f_3), (k_1, k_3)\}$	$\{(f_1, f_4), (f_1, k_4), (k_1, f_4), (k_1, k_4)\}$
KP2	$\{(f_2, f_1), (f_2, k_1), (k_2, f_1), (k_2, k_1)\}$	$\{(f_2, f_2), (f_2, k_2), (k_2, f_2), (k_2, k_2)\}$	$\{(f_2, f_3), (f_2, k_3), (k_2, f_3), (k_2, k_3)\}$	$\{(f_2, f_4), (f_2, k_4), (k_2, f_4), (k_2, k_4)\}$
KP3	$\{(f_3, f_1), (f_3, k_1), (k_3, f_1), (k_3, k_1)\}$	$\{(f_3, f_2), (f_3, k_2), (k_3, f_2), (k_3, k_2)\}$	$\{(f_3, f_3), (f_3, k_3), (k_3, f_3), (k_3, k_3)\}$	$\{(f_3, f_4), (f_3, k_4), (k_3, f_4), (k_3, k_4)\}$
KP4	$\{(f_4, f_1), (f_4, k_1), (k_4, f_1), (k_4, k_1)\}$	$\{(f_4, f_2), (f_4, k_2), (k_4, f_2), (k_4, k_2)\}$	$\{(f_4, f_3), (f_4, k_3), (k_4, f_3), (k_4, k_3)\}$	$\{(f_4, f_4), (f_4, k_4), (k_4, f_4), (k_4, k_4)\}$

Wird nun die Definition aus Gleichung 3.3 angewandt, ergeben sich die in Tabelle 4.3 dargestellten, injektiven Abbildungen. Kritikalitätsphänomen-Paare, zwischen denen keine gültige injektive Abbildung ermittelt werden konnte, können in keiner Abstraktionsbeziehung stehen. Somit kann an dieser Stelle bereits geschlussfolgert werden, dass KP1 und KP4 keine Abstraktionen von KP2 oder KP3 sein können. Andersherum ist dies durchaus noch möglich.

#### 4.4.3 Umsetzung des zweiten Schritts der Analyse

Im zweiten Schritt werden nun die ermittelten Abbildungen verwendet, um die räumlichen Aussagen der Intervalle der beiden Kritikalitätsphänomene zu überprüfen. Da pro Kritikalitätsphänomen-Paar jeweils nur eine gültige Abbildung ermittelt wurde, gibt es keinen Fall, in dem dieser Schritt mit mehreren Abbildungen durchgeführt werden muss.

Für die Durchführung dieses Schritts werden zudem die räumlichen Aussagen aller Intervalle der Kritikalitätsphänomene benötigt.

Die Entitäten der Kritikalitätsphänomene haben die gleichen Anzahlen und bis auf die angehängte Zahl auch vergleichbare Bezeichner. Die folgenden Entitäten sind dabei zu betrachten:

*Tabelle 4.2: Gültige Entitätspaare für die exemplarische Analyse vierer Kritikalitätsphänomene nach der Überprüfung mit Pellet*

	KP1	KP2	KP3	KP4
KP1	$\{(f_1, f_1), (k_1, k_1)\}$	$\{(k_1, k_2)\}$	$\{(k_1, k_3)\}$	$\{(f_1, f_4), (k_1, k_4)\}$
KP2	$\{(f_2, f_1), (k_2, k_1)\}$	$\{(f_2, f_2), (k_2, k_2)\}$	$\{(f_2, f_3), (k_2, k_3)\}$	$\{(f_2, f_4), (k_2, k_4)\}$
KP3	$\{(f_3, f_1), (k_3, k_1)\}$	$\{(f_3, f_2), (k_3, k_2)\}$	$\{(f_3, f_3), (k_3, k_3)\}$	$\{(f_3, f_4), (k_3, k_4)\}$
KP4	$\{(f_4, f_1), (k_4, k_1)\}$	$\{(k_4, k_2)\}$	$\{(k_4, k_3)\}$	$\{(f_4, f_4), (k_4, k_4)\}$

*Tabelle 4.3: Gültige injektive Abbildungen der Entitäten des ersten Kritikalitätsphänomens auf die Entitäten des zweiten Kritikalitätsphänomens für die exemplarische Analyse vierer Kritikalitätsphänomene nach der Überprüfung mit Pellet*

	KP1	KP2	KP3	KP4
KP1	$\{\{(f_1, f_1), (k_1, k_1)\}\}$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{\{(f_1, f_4), (k_1, k_4)\}\}$
KP2	$\{\{(f_2, f_1), (k_2, k_1)\}\}$	$\{\{(f_2, f_2), (k_2, k_2)\}\}$	$\{\{(f_2, f_3), (k_2, k_3)\}\}$	$\{\{(f_2, f_4), (k_2, k_4)\}\}$
KP3	$\{\{(f_3, f_1), (k_3, k_1)\}\}$	$\{\{(f_3, f_2), (k_3, k_2)\}\}$	$\{\{(f_3, f_3), (k_3, k_3)\}\}$	$\{\{(f_3, f_4), (k_3, k_4)\}\}$
KP4	$\{\{(f_4, f_1), (k_4, k_1)\}\}$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{\{(f_4, f_4), (k_4, k_4)\}\}$

- fz: Das Fahrzeug
- k: Die Kreuzung

Die Kreuzung ist zudem unterteilt. Dies wären nach der Formalisierung (vgl. Abschnitt 3.3) eigenständige Entitäten. Diese sind innerhalb dieser Anwendung jedoch wie zuvor beschrieben fest und mit entsprechenden Richtungen in der Ontologie eingebunden. Diese Teile entsprechen:

- v: Das Verbindungsstück
- hA: der hintere Arm
- vA der vordere Arm
- rA: der rechte Arm
- lA: der linke Arm

Diese Entitäten (und Unterteilungen) sind in allen vier Kritikalitätsphänomenen äquivalent. Daher gelten für alle Kritikalitätsphänomene die folgenden Voraussetzungen mit  $x \in \{1, 2, 3, 4\}$ :

```
"nodes": [
  ["fzx", ["Region"]],
  ["lAx", ["Region"]],
  ["rAx", ["Region"]],
  ["vAx", ["Region"]],
  ["hAx", ["Region"]],
  ["vx", ["Region"]],
  ["kx", ["Region"]],
]
```

Alle Kritikalitätsphänomene sind in drei Subintervalle unterteilt:

- Anfahren an die Kreuzung
- Befahren der Kreuzung
- Verlassen der Kreuzung

Die räumlichen Aussagen dieser Intervalle sind beispielhaft für das zweite Intervall des ersten Kritikalitätsphänomen dargestellt:

```
["fz", "v", "NTPP"],
["rA", "lA", "DC"],
["lA", "rA", "DC"],
["rA", "vA", "DC"],
["rA", "hA", "DC"],
["lA", "vA", "DC"],
["lA", "hA", "DC"],
["vA", "hA", "DC"],
["v", "hA", "DC"],
["v", "vA", "DC"],
["v", "rA", "DC"],
["v", "lA", "DC"],
["k", "vA", "TPPI"],
["k", "hA", "TPPI"],
["k", "rA", "TPPI"],
["k", "lA", "TPPI"],
["v", "k", "NTPP"],
["v", "rA", "EC"],
["v", "lA", "EC"],
["v", "hA", "EC"],
["v", "vA", "EC"],
```

Alle Eingaben finden sich zudem auf GitHub<sup>1</sup>.

Um nun eine zu prüfende Aussage zu erhalten, werden zusätzlich zu den räumlichen Aussagen des ersten zu prüfenden Intervalls auch die räumlichen Aussagen des zweiten zu prüfenden Intervalls angegeben. Laut Unterunterabschnitt 3.4.2.2 würden hier nun die Entitätsbezeichner des ersten Intervalls mittels der zuvor entwickelten Abbildung durch die des zweiten Intervalls ersetzt werden und somit den gleichen Bezeichner erhalten. Dies ist in qualreas allerdings nicht möglich, da die zweite Angabe einer Relation zwischen zwei Regionen die erste Angabe überschreibt. Daher werden die entsprechenden Entitätsbezeichner bezüglich ihrer Regionen gleichgesetzt:

```
["fz1", "fz2", "EQ"],
["k1", "k2", "EQ"],
["rA1", "rA2", "EQ"],
["lA1", "lA2", "EQ"],
["v1", "v2", "EQ"],
["vA1", "vA2", "EQ"],
["hA1", "hA2", "EQ"]
```

Anschließend wird folgendes Skript ausgeführt:

```
from Source import qualreas as qr
import os
from IPython.display import Image
qr_path = os.path.join
(os.getenv('PYPROJ'), 'qualreas')
```

<sup>1</sup> <https://github.com/Jystia/KPAnalysen>

Tabelle 4.4: Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP1 und KP2

	$r_{KP2,i1}$	$r_{KP2,i2}$	$r_{KP2,i3}$
$r_{KP1,i1}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	-	-
$r_{KP1,i2}$	-	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	-
$r_{KP1,i3}$	-	-	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$

Tabelle 4.5: Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP1 und KP3

	$r_{KP3,i1}$	$r_{KP3,i2}$	$r_{KP3,i3}$
$r_{KP1,i1}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	-	-
$r_{KP1,i2}$	-	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	-
$r_{KP1,i3}$	-	-	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$

```
alg_dir = os.path.join
    (qr_path, "Algebras")
rcc8_file = os.path.join
    (qr_path, "Networks", "rcc8_testKreuzung1.json")
print(rcc8_file)
rcc8_net = qr.Network
    (algebra_path=alg_dir, json_file_name=rcc8_file)
print(rcc8_net)
rcc8_net.summary(show_all=True)
ok = rcc8_net.propagate()

if ok:
    print("The network is consistent. Here's a summary:")
    rcc8_net.summary(show_all=True)

else:
    print("The network is inconsistent.")
```

Wie in der letzten Abfrage ersichtlich ist, liefert die Ausgabe entweder eine Bestätigung der Konsistenz der Aussage und die Zusammenfassung oder gibt aus, dass die Aussage nicht konsistent ist. Bei Konsistenz gilt die Aussage  $r_{A,i} \sqsubseteq_{\text{abs}} r_{B,j}$  nach Gleichung 3.4 für diese räumlichen Aussagen der Intervalle, bei Inkonsistenz nicht. Veroderungen innerhalb der räumlichen Aussagen müssen zudem als einzeln geprüft werden. Dabei muss gelten, dass eine dieser Aussagen des abstrakteren Phänomens gültig sein und alle dieser verodereten Aussagen für das konkretere Phänomen. Dieses Vorgehen ist nötig, da qualreas keine Oder-Relationen für räumliche Positionen erlaubt sind.

Es ergeben sich die in Tabelle 4.4 dargestellten Beziehungen zwischen den räumlichen Aussagen der Intervalle in KP1 und KP2, die in Tabelle 4.5 dargestellten Beziehungen zwischen den räumlichen Aussagen der Intervalle in KP1 und KP3, die in Tabelle 4.6 dargestellten Beziehungen zwischen den räumlichen Aussagen der Intervalle in KP1 und KP4, die in Tabelle 4.7 dargestellten Beziehungen zwischen den räumlichen Aussagen der Intervalle in KP2 und KP3, die in Tabelle 4.8 dargestellten Beziehungen zwischen den räumlichen Aussagen der Intervalle in KP2 und KP4 und die in Tabelle 4.9 dargestellten Beziehungen zwischen den räumlichen Aussagen der Intervalle in KP2 und KP4. Die Ausgaben des Programms für jeden dieser Vergleiche sind ebenfalls auf GitHub<sup>1</sup> zu finden.

Für die reflexiven Abstraktionsrelationen ist aus trivialen Gründen sicher, dass  $r_{A,i} \sqsubseteq_{\text{abs}} r_{A,i}$  gilt.

Tabelle 4.6: Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP1 und KP4

	$r_{KP4,i1}$	$r_{KP4,i2}$	$r_{KP4,i3}$
$r_{KP1,i1}$	$\supseteq_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	-	-
$r_{KP1,i2}$	-	$\supseteq_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	-
$r_{KP1,i3}$	-	-	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$

Tabelle 4.7: Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP2 und KP3

	$r_{KP3,i1}$	$r_{KP3,i2}$	$r_{KP3,i3}$
$r_{KP2,i1}$	$\supseteq_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	-	-
$r_{KP2,i2}$	-	$\supseteq_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	-
$r_{KP2,i3}$	-	-	$\supseteq_{\text{abs}}$

Tabelle 4.8: Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP2 und KP4

	$r_{KP4,i1}$	$r_{KP4,i2}$	$r_{KP4,i3}$
$r_{KP2,i1}$	$\supseteq_{\text{abs}}$	-	-
$r_{KP2,i2}$	-	$\supseteq_{\text{abs}}$	-
$r_{KP2,i3}$	-	-	$\supseteq_{\text{abs}}$

Tabelle 4.9: Darstellung der Relationen zwischen den räumlichen Aussagen der Kritikalitätsphänomene KP3 und KP4

	$r_{KP4,i1}$	$r_{KP4,i2}$	$r_{KP4,i3}$
$r_{KP3,i1}$	$\supseteq_{\text{abs}}$	-	-
$r_{KP3,i2}$	-	$\supseteq_{\text{abs}}$	-
$r_{KP3,i3}$	-	-	-

#### 4.4.4 Umsetzung des dritten Schritts der Analyse

Mithilfe dieser Ergebnisse lässt sich die zeitliche Ebene der Formalisierung auf Abstraktion überprüfen. Auch hier werden die Relationen überprüft, für die im ersten Schritt eine gültige injektive Abbildung gefunden wurde.

Dazu werden in qualreas die einzelnen Intervalle und ihre in der Formalisierung angegebenen Verknüpfungen eingegeben. Zusätzlich werden alle Intervalle der beiden Kritikalitätsphänomene kombinatorisch in Beziehung gesetzt. Die Art der Beziehung ist dabei wie in Gleichung 3.5 definiert. Somit werden für alle Intervalle, für die  $r_{A,i} \sqsubseteq_{\text{abs}} r_{B,i}$  gilt, Operatoren angegeben, die Parallelität der Intervalle erlauben, während solche für Intervalle, in denen dies nicht gegeben ist, nicht aufgeführt werden. Parallelität ist in diesem Zusammenhang nicht mit Äquivalenz gleichzusetzen, sondern bezeichnet den Fall, dass mindestens ein (beliebig kleiner) Teil der Intervalle zeitgleich abläuft.

Die zusätzliche Bedingung, dass die Hauptintervalle der beiden Kritikalitätsphänomene sich überschneiden müssen, verhindert zudem ein falsches Ergebnis des Programms, bei dem beide Intervalle hintereinander vorkommen. Dies wäre keine Aussage über die Abstraktion der beiden Kritikalitätsphänomene.

Eine beispielhafte Eingabe für KP1 und KP2 ist die folgende:

```
'name': 'Zeitliche Analyse',
'algebra': 'Extended_Linear_Interval_Algebra',
'abbreviations': {"?": "B|BI|D|DI|E|F|FI|M|MI|O|OI|S|SI"},
'description':
'Analyse der zeitlichen Ebene von KP1 (A) und KP2 (B)',
'nodes': [

  ['A', ['ProperInterval']],
  ['A1', ['ProperInterval']],
  ['A2', ['ProperInterval']],
  ['A3', ['ProperInterval']],

  ['B', ['ProperInterval']],
  ['B1', ['ProperInterval']],
  ['B2', ['ProperInterval']],
  ['B3', ['ProperInterval']],
],

'edges': [

# KP1: Nähern -> Befahren -> Verlassen
['A1', 'A2', 'M'],
['A2', 'A3', 'M'],
['A1', 'A', 'S'],
['A2', 'A', 'D'],
['A3', 'A', 'F'],

# KP2: Nähern -> Befahren -> Verlassen
['B1', 'B2', 'M'],
['B2', 'B3', 'M'],
['B1', 'B', 'S'],
['B2', 'B', 'D'],
['B3', 'B', 'F'],

#Kombinieren der Basisintervalle
['A1', 'B1', '?'],
['A1', 'B2', 'B|BI|M|MI'],
['A1', 'B3', 'B|BI|M|MI'],
['A2', 'B1', 'B|BI|M|MI'],
['A2', 'B2', '?'],
```

```

['A2', 'B3', 'B|BI|M|MI'],
['A3', 'B1', 'B|BI|M|MI'],
['A3', 'B2', 'B|BI|M|MI'],
['A3', 'B3', '?'],
['A', 'B', 'D|DI|E|F|FI|S|SI']
]

```

Alle Eingaben für die zeitliche Analyse der Beispielkritikalitätsphänomene ist ebenfalls in Github<sup>1</sup> zu finden. Für die Durchführung der Analyse wird ein der Raumanalyse sehr ähnliches Programm ausgeführt:

```

from Source import qualreas as qr
import json

time_net_dict = { ... }
time_net = qr.Network
    (algebra_path="../Algebras/", network_dict=time_net_dict)
print(time_net.description)
time_net.summary()

ok = time_net.propagate()

if ok:
    print("The network is consistent. Here's a summary:")
    time_net.summary(show_all=True)
else:
    print("The network is inconsistent.")

```

Die Ergebnisse dieser Analyse und damit auch des gesamten Analysevorgangs (vgl. Gleichung 3.6), sind in Tabelle 4.10 dargestellt.

*Tabelle 4.10: Geltende Abstraktionsbeziehungen zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen der exemplarischen Analyse*

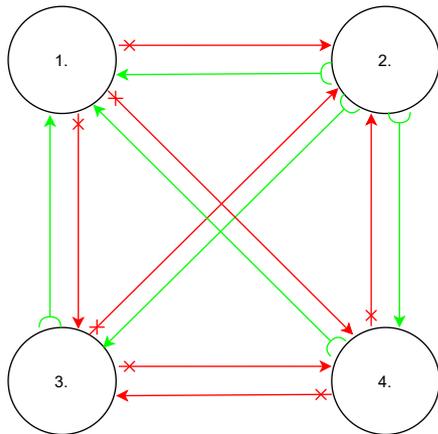
	KP1	KP2	KP3	KP4
KP1	$\exists_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$
KP2	$\exists_{\text{abs}}$	$\exists_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	$\exists_{\text{abs}}$	$\exists_{\text{abs}}$
KP3	$\exists_{\text{abs}}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	$\exists_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$	-
KP4	$\exists_{\text{abs}}$	$\sqsubseteq_{\text{abs}}$	-	$\exists_{\text{abs}} \wedge \sqsubseteq_{\text{abs}}$

#### 4.4.5 Zusammensetzung der Analysen

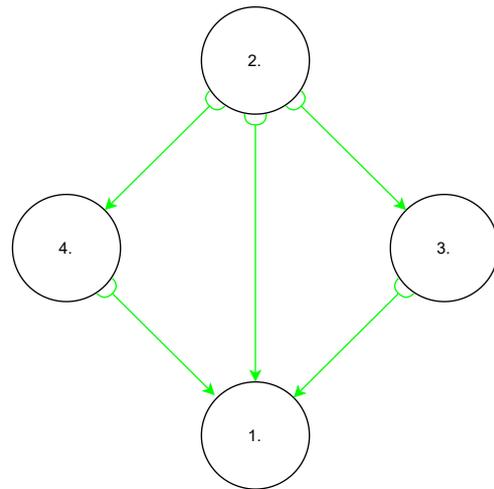
Nachdem alle Analysen durchlaufen wurden, können nun Aussagen über die zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen geltenden Abstraktionsrelationen getroffen werden. Da nirgends innerhalb der Analyse ein „don’t know“ als Ergebnis ausgegeben wurde, ist es für alle Relationen möglich, ein eindeutiges Ergebnis anzugeben.

Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

Diese zeigt deutlich, dass KP2 „Überfahren einer Kreuzung durch ein Fahrzeug“ eine Abstraktion aller anderen Kritikalitätsphänomene ist. In der Analyse hatten sich für dieses Kritikalitätsphänomen eine Abstraktion auf der Entitäts-Ebene bezüglich KP4, zwei Abstraktionen auf der räumlichen und



*Abbildung 4.5: Auswertung der Abstraktionsrelationen zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen nach der Analyse*



*Abbildung 4.6: Abstraktionshierarchie zwischen den vier Kritikalitätsphänomenen*

zeitlichen Ebene bezüglich des KP3 und Abstraktionen auf allen Ebenen bezüglich KP1 ergeben. KP3 „Rechtsabbiegen eines Fahrzeugs“ und KP4 „Überfahren einer Kreuzung durch einen LKW“ haben untereinander keine Abstraktionsbeziehung, da KP3 zwar gegenüber dem Vierten eine Abstraktion auf der Entitäts-Ebene aufweist, KP4 jedoch auf der räumlichen und zeitlichen Ebene eine Abstraktion von KP3 ist. Die Bedingung für eine Abstraktion nach Gleichung 3.6 ist somit nicht erfüllt.

Beide weisen jedoch Abstraktionen gegenüber KP1 „Rechtsabbiegen eines LKWs“ auf. Das KP3 auf der Entitäts-Ebene und KP4 auf der räumlichen und zeitlichen Ebene. Dies deckt sich mit den Abstraktionen von KP2, da die jeweiligen Ebenen dort noch keine Abstraktions-Bedingungen erfüllten.



## 5 Diskussion

Nachdem eine exemplarische Anwendung des Prozesses gezeigt wurde, folgt nun die Diskussion der Ergebnisse der Arbeit. Anschließend werden in diesem Kapitel noch offene Arbeitsstränge beschrieben und Ansätze für deren Bearbeitung gegeben.

### 5.1 Ergebnisse

Mithilfe des in dieser Arbeit entworfenen Prozesses ist es möglich, 173 von 239 Kritikalitätsphänomenen der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Datenbank zu formalisieren. Dies entspricht 72,38%. Diese Werte wurden durch experten-basierte Einschätzung für alle 239 Kritikalitätsphänomene ermittelt.

Für analog entwickelte Kritikalitäts-Kataloge ist mit einer ähnlichen Abdeckung zu rechnen, solange es sich auch dabei um allgemeine Sammlungen dieser handelt. Für spezifische Mengen von Kritikalitätsphänomenen ist die Art der enthaltenen Kritikalitätsphänomene maßgeblich entscheidend. Geht es beispielsweise um die Existenz von Entitäten, die zu erhöhter Assoziation mit Kritikalität führt, oder um räumlich-temporale Abläufe (z. B. Manöver wie Abbiegen oder Überholen) so sind diese Kritikalitätsphänomene mittels der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Formalisierung darstellbar.

Liegt eine Menge von Kritikalitätsphänomenen vor, die beispielsweise ein Weltbild oder komplexere physikalische Gleichungen (z. B. Lichtreflexionen) erfordern (vgl. Abschnitt 5.4), so wird die Abdeckungsrate durch die hier vorgestellte Formalisierung entsprechend geringer.

Für eine Formalisierung ohne den DCC wurde eine exemplarische Umsetzung einer Analyse gezeigt, die auch für eine Automatisierung implementiert werden kann (vgl. Abschnitt 5.4). Diese macht, ebenso wie die Beispiele in Abschnitt 3.4 deutlich, warum eine solche Implementierung sinnvoll ist. Neben der Vielzahl von Entitätspaaren in diesen klein gewählten Beispielen müssen auch große Mengen von räumlichen Aussagen überprüft werden. Eine automatisierte Durchführung dieser Schritte spart somit einen großen Aufwand gegenüber der händischen Auswertung. Dies ist vor allem darin begründet, dass alle nötigen Schritte automatisiert ablaufen können: Die Kombination von Entitätsbezeichnen und räumlichen Aussagen, die Substitution nach zuvor ermittelten Analysen, die Eingabe in Werkzeuge wie QUALREAS und natürlich die Analyse an sich.

Auch kann durch eine automatische Analyse die Validierung verbessert werden. Dies ist dann der Fall, wenn die Analyse eine Abstraktion feststellt, die nicht beabsichtigt war (und die in der natürlichsprachlichen Formulierung nicht offensichtlich ist). Es können also beispielsweise Modellierungsfehler aufgedeckt werden. Deren Behebung kann anhand der Ergebnisse zusätzlich vereinfacht werden, da aus den Ergebnissen abgelesen werden kann, an welcher Stelle diese Abstraktion auftritt.

Eine Automatisierung von Analysen über formalisierte Kritikalitätsphänomene birgt somit die Hoffnung, einen validierten Kritikalitätsphänomen-Katalog aufbauen zu können, dessen interne Relationen eingetragen oder zumindest einfacher zu untersuchen sind.

Diese Tatsache stellt die Imperativität einer Formalisierung deutlich dar. Doch auch ohne die automatisierte Analyse birgt eine Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen bereits ein Potential. Ein Katalog formalisierter Kritikalitätsphänomene könnte beispielsweise dafür genutzt werden, formale Anforderungen an automatisierte Fahrzeuge in der Entwicklung stellen zu können. Durch die klare,

formale Notation können diese Anforderungen in Tests einfacher und durch die Maschinenlesbarkeit auch automatisiert geprüft werden.

Ein Beispiel hierfür wäre die Anforderung, dass ein automatisiertes Fahrzeug bei Nebel seine Relativgeschwindigkeit um 30% verringern soll. Durch eine klare Formalisierung von Nebel und die zugehörige, eindeutige Anforderung an das Verhalten kann dieses nun eindeutig validiert werden.

## 5.2 Werkzeuge

Die in dieser Arbeit verwendeten Werkzeuge PELLET und QUALREAS haben maßgeblich zur Umsetzung der exemplarischen Analyse beigetragen. Während PELLET direkt in Protégé und damit auch direkt auf der Ontologie verwendet werden konnte, erfordert QUALREAS die Eingabe einzelner Anfragen im JSON-Format. Nach dieser Eingabe ist es möglich, die Aussagen prüfen zu lassen. Bei der Nutzung von PELLET müssen nur die Anfragen an die Ontologie eingegeben werden. Neben der Nutzung in Protégé ist PELLET auch als Teil eines Python Pakets namens *Owlready2* verfügbar<sup>2</sup>, sodass eine Einbettung beider Werkzeuge in ein gemeinsames Python-Projekt und somit auch eine gemeinsame Implementierung möglich ist.

Darüber hinaus ist vorteilhaft, dass beide Werkzeuge nach Einarbeitung intuitiv nutzbar sind.

## 5.3 Allens Temporal Logic

Bezüglich der Arbeit mit ATL ist anzumerken, dass darauf geachtet werden muss, dass das Kalkül weder herleitungs- noch widerspruchsvollständig ist (vgl. Unterabschnitt 2.4.2). Dadurch kann es vorkommen, dass eine Abstraktion gefunden wird, ohne dass tatsächlich eine solche vorliegt. Im Falle der Herleitungsvollständigkeit ist dieser Fall bereits so gut wie möglich eingeschränkt, indem für die einzelnen Intervallpaare nur solche Operatoren angegeben werden, die tatsächlich möglich sind. Es kann trotzdem vorkommen, dass Operatoren zwischen den Intervallen zugelassen werden, die nicht mit anderen hergeleiteten oder eingegebenen Operatoren im Einklang stehen[SS13].

Auch ist durch die fehlende Widerspruchsvollständigkeit nicht gegeben, dass in ATL in jedem Fall erkannt wird, ob ein Aussagensystem korrekt ist.

Es ist jedoch in jedem Fall korrekt, wenn in ATL eine Inkonsistenz festgestellt wird, sodass jede Verneinung einer Abstraktion auf der zeitlichen Ebene als korrekt angenommen werden kann [SS13].

## 5.4 Ausstehende Arbeiten

Der Fokus dieser Arbeit lag auf Kritikalitätsphänomenen mit zeitlichen Aspekten. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, können mit der hier entwickelten Prozess große Teile (72,38%) eines bereits bestehenden Kritikalitätsphänomen-Katalogs formalisiert werden.

---

<sup>2</sup><https://pypi.org/project/Owlready2/>

### 5.4.1 Formalisierung von Umfeldmodell-basierten Kritikalitätsphänomenen

Die Kritikalitätsphänomene dieses Katalogs, die noch nicht formalisiert werden können, basieren zum größten Teil auf einem Umfeldmodell der Akteure (vgl. fehlende Perzeption). Das heißt, dass zusätzlich zu dem Modell der Verkehrswelt für jeden Akteur in der Szene außerdem ein Umfeldmodell existieren muss, welches erlaubt Rückschlüsse darüber zu ziehen, welche Teile der absoluten Verkehrswelt für den jeweiligen Akteur wahrnehmbar sind.

Reese und Overton behandeln in ihrer Arbeit die Problematik von unvereinbaren Weltmodellen [RO70]. Müller et al. beschreiben ein Weltmodell hingegen als eine Aussage über das Wissen eines Agenten in einer Situation [MPT94].

Es müsste also voraussichtlich ebenfalls eine Logik über Wissen und Glauben verknüpft werden, um Rückschlüsse über Verhalten mit dem jeweiligen Umfeldmodell zu erlauben. Es ist beispielsweise denkbar, dass ein Fahrradfahrer an einer Kreuzung stehen bleibt, obwohl dort keine Ampel ist und er kein Fahrzeug wahrnimmt, da er weiß, dass er eine der Seitenstraßen nicht einsehen kann.

In seiner Arbeit aus 2006 liefert Robert Stalnaker eine Übersicht über Logiken, welche sich mit dieser Problematik beschäftigen [Sta06].

Einen Ansatz für die Umsetzung für sich verändernde Glaubenssätze (eng.: Beliefs) stellt die Nutzung Bayescher Netze da. Dabei werden die Glaubenssätze bei Eingabe neuer Tatsachen angepasst [MWJ13; FM97].

Eine Wahl einer Logik, ein formaler Aufbau eines Umfeldmodells mit allen entsprechenden Annahmen und die Verknüpfung mit der hier vorgestellten Formalisierung sind noch ausstehend.

### 5.4.2 Ausstehende Arbeit in der Analyse

Ein weiterer noch offener Punkt dieser Arbeit befindet sich innerhalb des Schrittes der Analyse. In Abschnitt 4.4 wurde eine exemplarische Analyse von vier Kritikalitätsphänomenen durchgeführt. Jedoch ist es noch nicht möglich, diese Analyse ebenfalls für den *Double Cross Calculus* durchzuführen, sodass eine Anpassung der Formel erfolgen musste.

Diese Umsetzung ist automatisiert möglich, eine Implementierung steht jedoch noch aus. Es wurde in einer Arbeit von Gerevini gezeigt, dass die Kombination von RCC8 und ATL NP-vollständig ist [GN02]. Lutz und Miličić haben gezeigt, dass Beschreibungslogiken in Verbindung mit RCC8 entscheidbar sind [LM07]. Die Komplexitätsklasse und Entscheidbarkeit einer Verbindung von ATL und RCC8 mit der hier angegebenen, abgewandelten Einbettung der Beschreibungslogiken, muss noch analysiert werden.

Eine automatisierte Analyse von Abstraktion auf einer Menge von Kritikalitätsphänomenen durch Nutzung der Analyse zweier Kritikalitätsphänomene wäre ebenfalls denkbar.

#### 5.4.2.1 Implementierung der Analyse

Wie vorangegangen bereits mehrfach erwähnt, wurde die in dieser Arbeit vorgestellte exemplarische Umsetzung der Analyse händisch durchgeführt. Dabei wurden zwar die vorgestellten Werkzeuge PELLET (siehe Unterunterabschnitt 2.3.2.2) und QUALREAS verwendet, jedoch nicht direkt miteinander verknüpft.

Um diese Verbindung umzusetzen, ist ein Ansatz denkbar, in dem Formeln für die Kritikalitätsphänomene in ein Python-Programm eingegeben werden. Dieses Programm wertet zunächst die in Definition 2.1.2 definierten Mengen aus und speichert diese für die spätere Verwendung. Anschließend wird die Analyse der Entitäten durchgeführt. Die ermittelten Abbildungen werden gespeichert und der Analyse der räumlichen Aussagen sowie der Zeit übergeben. Die Analyse der zeitlichen Ebene erhält ergänzend die Aussagen, die in der räumlichen Analyse ermittelt wurden.

Die Umsetzung dieses Konzepts würde eine automatische Überprüfung zweier Kritikalitätsphänomene ermöglichen.

Als Basis müssten die für diese Analyse notwendige, in sich konsistente, vermutlich sehr große Ontologie und eine (große) Menge widerspruchsfreier Kritikalitätsphänomene erstellt werden.

Nach der Umsetzung ist es denkbar, den entwickelten Katalog wie in Abschnitt 5.1 beschrieben einzusetzen.

## 6 Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Prozess zur Formalisierung und Analyse von sicherheitsrelevanten Phänomenen (in dieser Arbeit als Kritikalitätsphänomene bezeichnet) entworfen. Dafür wurde jeder Schritt dieses Prozesses beschrieben. Für die Formulierung von Kritikalitätsphänomenen in natürlicher Sprache wurde der Ansatz einer kontextfreien Grammatik auf Basis einer Ontologie vorgestellt.

Der Fokus der Arbeit lag auf der Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen und auf der anschließenden Analyse der formalisierten Kritikalitätsphänomene. Die in dieser Arbeit beschriebene Formalisierung erlaubt die formale Darstellung von Kritikalitätsphänomenen mit räumlich-zeitlichen Abläufen und Entitäten im Bereich eines Weltmodells ohne Umfeldmodelle der einzelnen Akteure.

Innerhalb der exemplarischen Umsetzung der Formalisierung ist aufgefallen, dass Kritikalitätsphänomene mit einem hohen Abstraktionsgrad meist nur über Veroderung formalisiert werden können. Dadurch können zwar viele Fälle abgedeckt werden, die Abdeckung aller diesem abstrakten Kritikalitätsphänomen zugeordneten Fälle kann aber nicht gewährleistet werden.

Auch zu konkrete Kritikalitätsphänomene sind schwierig zu formalisieren. Dies liegt dabei nicht an zu vielen abzudeckenden Fällen, sondern an der Zahl der Einflussfaktoren, die in der formalen Beschreibung eingebunden werden müssen. Dies ist zwar prinzipiell möglich, erfordert aber die Aufnahme aller benötigten Eigenschaften in die zugrundeliegende Ontologie. Im Falle von sehr konkreten räumlichen oder zeitlichen Aussagen müssten zudem andere Kalküle eingebunden werden, da es weder in RCC noch im DCC möglich ist, konkrete Abstände zu definieren, und ATL keine Angabe konkreter Zeitpunkte erlaubt. Das Darstellen eines Kritikalitätsphänomens wie „Überholen eines PKW mit 2m Abstand um 21 Uhr“ ist daher mit der hier vorgestellten Formalisierung nur mit Erweiterungen möglich.

Bezüglich der Analyse wurde in dieser Arbeit festgestellt, dass eine automatisierte Analyse formalisierter Kritikalitätsphänomene durchführbar ist. Der Umfang der Analyse ist dabei jedoch stark abhängig von den verwendeten Konzepten und dafür entwickelten Werkzeugen. Auch wurde ermittelt, dass eine automatisierte Analyse von ATL nicht immer korrekte Ergebnisse liefert. Daher müssten Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgestellten Analyse überprüft werden, wenn die Analyse eine Abstraktion ergibt. Dies ergibt sich daraus, dass ATL erkennen kann, wenn keine Abstraktion vorliegt. In diesem Fall ist die Analyse korrekt. Wird als Ergebnis eine Abstraktion ermittelt, so kann durch die fehlende Herleitungs- und Widerspruchs-Vollständigkeit von ATL trotzdem der Fall gegeben sein, dass keine Abstraktion vorliegt.

In dieser Arbeit wurden einerseits die grundsätzliche Möglichkeit einer Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen vorgestellt, andererseits wurde aber auch aufgezeigt, dass selbst bei der Betrachtung von Ausschnitten der Verkehrswelt ohne Berücksichtigung ihrer Agenten die Analyse komplex ist und einiger Vorarbeit bedarf. Abschließend kann gesagt werden, dass eine automatisierte Analyse und die damit einhergehende maschinenlesbare Formalisierung von Kritikalitätsphänomenen einen erheblichen Mehrwert für die Validierung und Verifikation bieten. Mit dieser Arbeit wurde gezeigt, welche Schritte für das Erreichen dieses Ziels nötig sind. Der hier vorgestellte Prozess ist umsetzbar und ab der Formalisierung implementierbar. Betrachtet man die Formulierung mittels einer Grammatik könnte sogar dieser Schritt in einer Implementierung miteinbezogen werden, um die Erhebung der Kritikalitätsphänomene zu erleichtern und eine einheitliche, natürlichsprachliche Formulierung zu ermöglichen.

---

Die exemplarische Umsetzung sowie die noch offenen Arbeitsstränge zeigen auf, welche Hürden auf dem Weg zu einer vollständigen Automatisierung der Analyse und vollständiger Maschinenlesbarkeit von Kritikalitätsphänomenen noch zu überwinden sind. Ist dies geschafft, bieten sich neue Möglichkeiten im Bereich der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge. Aufgrund der Komplexität bleibt derzeit offen, ob es möglich ist, während der Laufzeit des Systems eine solche Lösung innerhalb eines Realzeitsystems erfolgreich einzubinden und für die Umsetzung außerhalb der Validierung und Verifikation nutzbar zu machen.

## Literatur

- [Whi20] Alfred North Whitebread. “The Concept of Nature”. In: (1920).
- [Whi29] Alfred North Whitehead. “Process and reality: An essay in cosmology”. In: (1929).
- [Lov68] Julie Beth Lovins. “Development of a stemming algorithm.” In: *Mech. Transl. Comput. Linguistics* 11.1-2 (1968), S. 22–31.
- [RO70] Hayne W Reese und Willis F Overton. “Models of development and theories of development”. In: *Life-span developmental psychology*. Elsevier, 1970, S. 115–145.
- [Kem76] Oscar Kempthore. “Of what use are tests of significance and tests of hypothesis”. In: *Communications in statistics-theory and methods* 5.8 (1976), S. 763–777.
- [Pnu77] Amir Pnueli. “The temporal logic of programs”. In: *18th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1977)*. IEEE, 1977, S. 46–57.
- [LP79] G Frank Lawlis und Leon A Peek. “Testing the null hypothesis: an unstatement”. In: (1979).
- [All81] JF Allen. *Maintaining Knowledge about Temporal Intervals, Department of Computer Science, University of Rochester, Rochester, NY 14627*. Techn. Ber. TR 86, 1981.
- [Cla81] Bowman L Clarke. “A calculus of individuals based on “connection”.” In: *Notre Dame Journal of formal logic* 22.3 (1981), S. 204–218.
- [All84] James F Allen. “Towards a general theory of action and time”. In: *Artificial intelligence* 23.2 (1984), S. 123–154.
- [Hol86] Paul W Holland. “Statistics and causal inference”. In: *Journal of the American statistical Association* 81.396 (1986), S. 945–960.
- [Hub87] Carl J Huberty. “On statistical testing”. In: *Educational Researcher* 16.8 (1987), S. 4–9.
- [LM87] Peter Ladkin und Roger D Maddux. *The algebra of convex time intervals*. Kestrel Institute Palo Alto, California, 1987.
- [Lad87] Peter Bernard Ladkin. “The logic of time representation”. Diss. Citeseer, 1987.
- [VKV90] Marc Vilain, Henry Kautz und Peter Van Beek. “Constraint propagation algorithms for temporal reasoning: A revised report”. In: *Readings in qualitative reasoning about physical systems*. Elsevier, 1990, S. 373–381.
- [CPR91] Corine Cauvet, C Proix und Colette Rolland. “ALECSI: An expert system for requirements engineering”. In: *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*. Springer, 1991, S. 31–49.
- [CHR91] Zhou Chaochen, Charles Anthony Richard Hoare und Anders P Ravn. “A calculus of durations”. In: *Information processing letters* 40.5 (1991), S. 269–276.
- [SS91] Manfred Schmidt-Schauß und Gert Smolka. “Attributive concept descriptions with complements”. en. In: *Artificial Intelligence* 48.1 (Feb. 1991), S. 1–26. ISSN: 00043702. DOI: 10.1016/0004-3702(91)90078-X. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000437029190078X> (besucht am 22. 09. 2021).
- [Fre92] Christian Freksa. “Using orientation information for qualitative spatial reasoning”. In: *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*. Springer, 1992, S. 162–178.

- [RCC92] David A Randell, Zhan Cui und Anthony G Cohn. "A spatial logic based on regions and connection." In: *KR 92* (1992), S. 165–176.
- [RP92] Colette Rolland und Christophe Proix. "A natural language approach for requirements engineering". In: *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*. Springer. 1992, S. 257–277.
- [Hul93] David Hull. "Using statistical testing in the evaluation of retrieval experiments". In: *Proceedings of the 16th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. 1993, S. 329–338.
- [Ben94] Brandon Bennett. "Spatial reasoning with propositional logics". In: *Principles of Knowledge Representation and Reasoning*. Elsevier. 1994, S. 51–62.
- [MPT94] Jörg P Müller, Markus Pischel und Michael Thiel. "Modeling reactive behaviour in vertically layered agent architectures". In: *International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer. 1994, S. 261–276.
- [Hul96] David A Hull. "Stemming algorithms: A case study for detailed evaluation". In: *Journal of the American Society for Information Science* 47.1 (1996), S. 70–84.
- [Coh+97] Anthony G Cohn u. a. "Qualitative spatial representation and reasoning with the region connection calculus". In: *GeoInformatica* 1.3 (1997), S. 275–316.
- [Edw+97] Stephen Edwards u. a. "Design of embedded systems: Formal models, validation, and synthesis". In: *Proceedings of the IEEE* 85.3 (1997), S. 366–390.
- [FM97] Brendan J Frey und David MacKay. "A revolution: Belief propagation in graphs with cycles". In: *Advances in neural information processing systems* 10 (1997).
- [Gra97] Jeffrey O Grady. *System validation and verification*. Bd. 12. CRC Press, 1997.
- [BLG98] O Bielsa, J Lloreta und A Gelabert-Mas. "Cystic renal cell carcinoma: pathological features, survival and implications for treatment." In: *British journal of urology* 82.1 (1998), S. 16–20.
- [Kna99] Markus Knauff. "The cognitive adequacy of Allen's interval calculus for qualitative spatial representation and reasoning". In: *Spatial Cognition and Computation* 1.3 (1999), S. 261–290.
- [HM01] V Haarslev und R Möller. *RACER system description, in 'IJCAR'01: Proceedings of the First International Joint Conference on Automated Reasoning'*. 2001.
- [SN01] Alexander Scivos und Bernhard Nebel. "Double-crossing: Decidability and computational complexity of a qualitative calculus for navigation". In: *International Conference on Spatial Information Theory*. Springer. 2001, S. 431–446.
- [GN02] Alfonso Gerevini und Bernhard Nebel. "Qualitative spatio-temporal reasoning with RCC-8 and Allen's interval calculus: Computational complexity". In: *ECAI*. Bd. 2. 2002, S. 312–316.
- [GR02] Alfonso Gerevini und Jochen Renz. "Combining topological and size information for spatial reasoning". In: *Artificial Intelligence* 137.1-2 (2002), S. 1–42.
- [WZ02] Frank Wolter und Michael Zakharyashev. "Qualitative spatio-temporal representation and reasoning: a computational perspective". In: *Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium* (2002), S. 175–216.

- [Baa+03] Franz Baader u. a. *The description logic handbook: Theory, implementation and applications*. Cambridge university press, 2003.
- [Gen+03] John H Gennari u. a. “The evolution of Protégé: an environment for knowledge-based systems development”. In: *International Journal of Human-computer studies* 58.1 (2003), S. 89–123.
- [HPV03] Ian Horrocks, Peter F Patel-Schneider und Frank Van Harmelen. “From SHIQ and RDF to OWL: The making of a web ontology language”. In: *Journal of web semantics* 1.1 (2003), S. 7–26.
- [LY03] Sanjiang Li und Mingsheng Ying. “Region connection calculus: Its models and composition table”. In: *Artificial Intelligence* 145.1-2 (2003), S. 121–146.
- [Ren03] Jochen Renz. *Qualitative spatial reasoning with topological information*. Bd. 2293. Springer, 2003.
- [BOS04] P. Buitelaar, D. Olejnik und Michael Sintek. “A Protégé Plug-In for Ontology Extraction from Text Based on Linguistic Analysis”. In: *ESWS*. 2004. DOI: 10.1007/978-3-540-25956-5\_3.
- [LRC05] Erich Leo Lehmann, Joseph P Romano und George Casella. *Testing statistical hypotheses*. Bd. 3. Springer, 2005.
- [Kra+06] Steven Kraines u. a. “EKOSS: A Knowledge-User Centered Approach to Knowledge Sharing, Discovery, and Integration on the Semantic Web”. In: *The Semantic Web - ISWC 2006*. Hrsg. von Isabel Cruz u. a. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 833–846. ISBN: 978-3-540-49055-5.
- [Sta06] Robert Stalnaker. “On logics of knowledge and belief”. In: *Philosophical Studies: An International Journal for Philosophy in the Analytic Tradition* 128.1 (2006), S. 169–199.
- [LM07] Carsten Lutz und Maja Miličić. “A tableau algorithm for description logics with concrete domains and general tboxes”. In: *Journal of Automated Reasoning* 38.1 (2007), S. 227–259.
- [Don08] Tiansi Dong. “A comment on RCC: from RCC to RCC++”. In: *Journal of Philosophical Logic* 37.4 (2008), S. 319–352.
- [Gra+08] Bernardo Cuenca Grau u. a. “OWL 2: The next step for OWL”. In: *Journal of Web Semantics* 6.4 (2008), S. 309–322.
- [SD08] Dan A Simovici und Chabane Djeraba. “Mathematical tools for data mining”. In: *SpringerVerlag, London* (2008).
- [Gru09] Tom Gruber. “Ontology.” In: *Encyclopedia of database systems* 1 (2009), S. 1963–1965.
- [Pea09] Judea Pearl. “Causal inference in statistics: An overview”. In: *Statistics surveys* 3 (2009), S. 96–146.
- [FV10] Andrei Furda und Ljubo Vlacic. “An Object-Oriented Design of a World Model for Autonomous City Vehicles”. In: Juli 2010, S. 1054–1059. DOI: 10.1109/IVS.2010.5548138.
- [HR10] Miguel A Hernán und James M Robins. *Causal inference*. 2010.

- [Pea10] Judea Pearl. “Causal inference”. In: *Causality: Objectives and Assessment* (2010), S. 39–58.
- [Whi10] Alfred North Whitehead. *Process and reality*. Simon und Schuster, 2010.
- [BW11] Manuel Bodirsky und Stefan Wöfl. “RCC8 Is Polynomial on Networks of Bounded Treewidth.” In: Jan. 2011, S. 756–761. DOI: 10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-133.
- [FJR11] Joseacute Garciacute Francisco, Garciacute a Juan und Theroacute n Roberto. “Analysis of the OWL ontologies: A survey”. en. In: *Scientific Research and Essays* 6.20 (Sep. 2011), S. 4318–4329. ISSN: 1992-2248. DOI: 10.5897/SRE11.1036. URL: <http://academicjournals.org/journal/SRE/article-abstract/BEF377D39297> (besucht am 27.07.2021).
- [Jiv+11] Anjali Ganesh Jivani u. a. “A comparative study of stemming algorithms”. In: *Int. J. Comp. Tech. Appl* 2.6 (2011), S. 1930–1938.
- [Whi11] Alfred North Whitehead. *An enquiry concerning the principles of natural knowledge*. Cambridge University Press, 2011.
- [Mil13] Justin J Miller. “Graph database applications and concepts with Neo4j”. In: *Proceedings of the southern association for information systems conference, Atlanta, GA, USA*. Bd. 2324. 36. 2013.
- [MWJ13] Kevin Murphy, Yair Weiss und Michael I Jordan. “Loopy belief propagation for approximate inference: An empirical study”. In: *arXiv preprint arXiv:1301.6725* (2013).
- [SS13] Manfred Schmidt-Schauß und David Sabel. “Einführung in die Methoden der künstlichen Intelligenz”. In: *Institut für Informatik, Goethe-Universität Frankfurt am Main* (2013).
- [Mus15] Mark A Musen. “The protégé project: a look back and a look forward”. In: *AI matters* 1.4 (2015), S. 4–12.
- [Ulbr+15] Simon Ulbrich u. a. “Defining and substantiating the terms scene, situation, and scenario for automated driving”. In: *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE. 2015, S. 982–988.
- [KW16] Philip Koopman und Michael Wagner. “Challenges in Autonomous Vehicle Testing and Validation”. In: *SAE International Journal of Transportation Safety* 4 (2016), S. 15–24. DOI: 10.4271/2016-01-0128.
- [OAM17] Matthew O’Kelly, Houssam Abbas und Rahul Mangharam. “Computer-Aided Design for Safe Autonomous Vehicles”. In: (Mai 2017).
- [Dam+18] Werner Damm u. a. “A Formal Semantics for Traffic Sequence Charts: Essays Dedicated to Edward A. Lee on the Occasion of His 60th Birthday”. In: Juli 2018, S. 182–205. ISBN: 978-3-319-95245-1. DOI: 10.1007/978-3-319-95246-8\_11.
- [Buz19] Igor Buzhinsky. “Formalization of natural language requirements into temporal logics: a survey”. In: *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Bd. 1. 2019, S. 400–406. DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972130.
- [Pod+19] Alexander Poddey u. a. “On the validation of complex systems operating in open contexts”. In: *arXiv preprint arXiv:1902.10517* (2019).

- 
- [Maj+21] Rupak Majumdar u. a. *Paracosm: A Language and Tool for Testing Autonomous Driving Systems*. 2021. arXiv: 1902.01084 [cs.SE].
- [Neu+21] Christian Neurohr u. a. “Criticality Analysis for the Verification and Validation of Automated Vehicles”. In: *IEEE Access* 9 (2021), S. 18016–18041. ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3053159. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9330510/> (besucht am 29.06.2021).
- [ISO13] ISO. *25964-2, Information and documentation — Thesauri and interoperability with other vocabularies — Part 1: Thesauri for information retrieval*. Standard. Geneva, CH: International Organization for Standardization, Aug. 2013.
- [Wes+22] Lukas Westhofen u. a. *Using Ontologies for the Formalization and Recognition of Criticality for Automated Driving*. To be submitted, 2022.



## **Appendices**



## A Tabellen

*Tabelle A.1: Tabelle aller in  
Kritikalitätsphänomenen der Datenbank  
enthaltener Wörter*

Wort	Vorkommen
Interaktion	5
mit	14
öffentliche Verkehrsmittel	1
nicht gewöhnlich	1
Fahrzeug	17
Kreuzend	5
VRU	5
beim	2
rechts	2
abbiegen	2
Gegenverkehr	1
links	1
unerwartet	4
aber	1
legitim	1
überqueren/Überquerung	2
Straße	34
von	21
Schneehaufen	1
auf	34
Laubhaufen	1
Ball	1
Ballon	1
in	11
Nähe	7
Ego	6
Metall	2
Dose	1
Fahrbahn	9
Ladung	2
Müll	1
Ast	1
Nebel	1
Wind	1
Schnee	2
Witterungsverhältnisse	1

Fortsetzung in der nächsten Spalte

### Fortsetzung der vorherigen Spalte

Wort	Vorkommen
Hagel	1
Regen	1
eingeschränkt	1
global	1
Lichtquelle	1
Änderung	2
wechseln	1
Helligkeit	1
Blendung	3
durch	7
Sonnenlicht	1
extrem	1
Veränderung	1
Temperatur	1
Rauch	1
Funkloch	1
Unfallstelle	2
Sichtverdeckung	1
verdeckt	10
Straßenbahnschienen	1
Geschwindigkeit	3
inoffiziell	2
Haustier	1
Subjekt	1
Fußgänger	6
direkt	1
Weg	1
spaziert	1
willkürlich	1
passieren	3
temporär	5
parkend	3
gering	8
Abstand	7
zu	6
Verkehrsteilnehmer	6
Spurmarkierung	1
Straßenrand	1
Fehlinterpretation	4
Signal	5
akustisch	1

Fortsetzung in der nächsten Spalte

<b>Fortsetzung der vorherigen Spalte</b>	
Wort	Vorkommen
Handzeichen	1
auffällig	1
Trajektorie	2
Non-Ego-TP	30
unzureichend	2
Straßenbeleuchtung	1
unpassend	2
Verkehrszeichen	4
Kuppe	1
Hügel	1
Fahrstreifenmarkierung	3
gefährlich	1
Beladung	1
Lenkmanöver	2
be-/entladen	1
illegal	2
anhalten	1
parken	3
dunkle	1
Kleidung	1
permanent	1
Sichtverhinderung	1
nutzt	2
befahrbar	1
überholen	6
Fahrbahn	9
unzulässig	1
fehlend	5
Bahnübergang	1
toter Winkel	1
bedeckt	1
Gischt	1
herausragend	1
Schienen	1
Sperrung	1
verschlechtert	1
Fahrspurbreite	1
Einbahnstraße	1
Verkehr	2
beide	1
Richtung	3

Fortsetzung in der nächsten Spalte

<b>Fortsetzung der vorherigen Spalte</b>	
Wort	Vorkommen
Tunnel	1
verschmutzt	1
Straßenoberfläche	2
Benutzung	1
Fußgängerüberweg	1
beschädigt	3
Infrastruktur	1
defekt	3
außer Betrieb	1
LSA	1
Baustellenrückstände	1
schmal	1
Nutzung	3
Gegenfahrstreifen	1
manuell	1
Verkehrsreglung	1
Abblendlicht	1
hoch	1
eingestellt	1
brennend	2
Objekt	18
Fahrbahnnähe	2
Anwesenheit	2
URU	2
Fahrbahnzugang	3
wildes Tier	1
ungesichert	1
liegen geblieben	1
Radfahrer	6
Radfahrerschutzstreifen	1
Fahrradweg	1
PKW-Fahrstreifen	1
Bus	1
Bushaltestelle	1
langsam	1
Einsatzstelle	1
mehrere	1
trotz	1
Überholverbot	1
riskant	1
führt aus	1

Fortsetzung in der nächsten Spalte

<b>Fortsetzung der vorherigen Spalte</b>		<b>Fortsetzung der vorherigen Spalte</b>	
Wort	Vorkommen	Wort	Vorkommen
Fahrstreifenwechsel	1	Lichtsignal	1
wechselt	1	vorderen	1
Falschfahrer	2	Seitenabstand	1
motorisiert	1	hinteren	1
drängeln	1	andere	3
Motorradfahrer	1	geplant	1
Rückstau	2	Straßenschild	1
an	4	Hindernis	1
Kreuzung	2	überhöht	1
Abbiegefahrstreifen	1	nicht	2
stark	2	angepasst	1
Bremsmanöver	2	hohe	3
Lenkmanöver	2	extern	1
entgegenkommend	3	äußere	1
schneiden	3	Kraft	1
Überholvorgang	1	auflösbar	1
groß	1	Vorfahrtssituation	1
Wenden	2	blendet	1
erlaubt	1	Aufblendlicht	1
einparkend	1	überfährt	1
ausparkend	1	rot	1
Fahrstreifennähe	2	Ampel	1
Präsenz	1	missachtet	1
degradiert	2	Vorfahrt	3
Fahrzeugteile	2	Missachtung	1
beeinträchtigt	2	Reißverschlussverfahren	1
Einsatzfahrzeug	1	vorrangig	1
Service-Fahrzeug	1	Straßensteigung	1
Fahraufgabe	1	Straßengefälle	1
abgelenkt	1	Kurvigkeit	1
Fahrfähigkeit	1	nach	1
Aggressiv	1	außen	1
fahren	5	abfallend	1
emotional	1	lateral	1
Fahrverhalten	1	Straßenneigung	1
Fehlverhalten	1	Kurve	1
Fahrtrichtungsanzeiger	1	Brücke	3
Blinken	1	Radwegfurt	1
fehlerhaft	1	Fußgängerfurt/-überweg	1
unnötig	1	Allee	1
Langsamfahren	1	Gewässer	1
Fortsetzung in der nächsten Spalte		Fortsetzung in der nächsten Spalte	

<b>Fortsetzung der vorherigen Spalte</b>	
Wort	Vorkommen
Fahrstreifen	4
Verkehrsinfrastruktur	1
Licht	4
Interferenz	2
Flackern	1
Artefakte	1
Eisplatte	1
LKW	1
Dach	1
Sensorabdeckung	4
mechanisch	1
Straßenbebauung	1
Mehrwegeempfang	1
unter hindurch	1
präsent	1
Abtastrateneffekt	1
über	2
falsche	1
baulich	2
Struktur	2
Höhenklassifizierung	1
ohne	1
ontologisch	1
Darstellung	1
Szene	1
optisch	3
Verzerrung	3
Umweltfaktoren	1
Eigenschaften	1
Sensor	7
Karneval	1
Glasobjekt	1
Streuung	1
Schicht	1
Frost	1
Spiegelung	1
Remission	1
Gullydeckel	1
Lichtstörung	1
Staub	1
Sand	1
Fortsetzung in der nächsten Spalte	

<b>Fortsetzung der vorherigen Spalte</b>	
Wort	Vorkommen
Luftpartikel	1
Aquaplaning	1
Geisterobjekt	1
Pelzmantel	1
Fehlperzeption	1
Teilperzeption	1
Sensorüberlagerung	1
Werbefläche	1
Gebäude	1
außergewöhnlich	1
gekleidet	1
elektromagnetisch	4
Vibration	1
TP	1
Manöver	1
Transparenz	1
keine	1
Perzeption	2
ungenau	1
nass	1
vereist	1
uneben	1
Rückstreuung	1
Strahlung	1
sich bewegend	1
Bezug	1
Relativgeschwindigkeit	2
Straßenqualität	1
Straßenbelag	1
schlecht	1
Straßenhaftung	1
vermindert	1
Fernlicht	1
blockiert	1
physikalisch	1
diffus	1
reflektierend	1
Oberflächen	1
sonstiges	1
Reglung	1
nahe	1
Fortsetzung in der nächsten Spalte	

---

**Fortsetzung der vorherigen Spalte**

Wort	Vorkommen
Reichweite	1
außerhalb	4
Schärfeebene	1
Kamera	1
Straßenzustand	1
abnormal	2
Effekte	1
Beschilderung	1
Trennschärfe	1
Radar	1
Radarquerschnitt	1
niedrig	1
Erkennungsbereich	1
Sichtfeld	1
Blockierung	1
relevant	1
Wellen	1
weiteres	1
Transmission	1
Absorption	1
Spektrum	1
entsprechend	1
	736

---

Abgeschlossen

---



## Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Außerdem versichere ich, dass ich die allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und Veröffentlichung, wie sie in den Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg festgelegt sind, befolgt habe.

Oldenburg, den 7. März 2022



A handwritten signature in cursive script, appearing to read "A. Weißer", is written above a horizontal line.