

# 1. Einführung

„Infrastrukturen sind mehr als nur die materielle Voraussetzung für wirtschaftliches Leben. Sie sind gespeicherter gesellschaftlicher Reichtum und bestimmen über die Teilhabe am Gemeinwesen“ – so beschreiben Reinhard Loske und Roland Schaeffer die Bedeutung von Infrastrukturnetzen für unser Leben in dem Sammelband „Die Zukunft der Infrastrukturen“ [LS05]. Zu den *materiellen* oder *netzgebundenen* Infrastrukturen (manchmal auch *Netz-Infrastrukturen* oder *physische Infrastrukturnetze*) zählen Verkehrsinfrastrukturen wie Schiene, Straße, Luft und See, Energieinfrastrukturen wie Strom- und Gasnetze sowie Wasserversorgungs- und -entsorgungsinfrastrukturen. Diese sind im Laufe der Zeit mit den zunehmenden Bedürfnissen ihrer Nutzer gewachsen. Um ihrer Rolle auch in Zukunft gerecht werden zu können, sind bei der Bereitstellung dieser Infrastrukturen grundlegende Veränderungen nötig.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle und zukünftige Herausforderungen für die Betreiber von Infrastrukturnetzen. Daraus wird die Aufgabenstellung dieser Arbeit motiviert und eine Vorschau auf die entwickelten Lösungsbeiträge gegeben. Dazu beziehen sich die folgenden Beispiele auf Schienen- und Stromnetze als typische Vertreter von Verkehrs- und Energieinfrastrukturen.

**Herausforderungen für Infrastrukturnetze der Zukunft.** Alle Prognosen stimmen überein: Betreiber von Infrastrukturnetzen müssen immer höhere Kapazitäten bereitstellen, sie müssen ihre Netze verstärkt mit denen anderer Betreiber und über Landesgrenzen hinweg integrieren, und gleichzeitig muss die Kosteneffizienz von Betrieb und Wartung stetig gesteigert werden. Diese Vorhersagen werden unter anderem durch die folgenden Fakten gestützt.

Weil Infrastrukturnetze bereits heute an ihrer Belastungsgrenze betrieben werden, müssen sie in Zukunft *höhere Kapazitäten* zur Verfügung stellen: So musste das britische Schienennetz in den letzten zehn Jahren einen Anstieg der Personenkilometer um 42 Prozent und der Tonnenkilometer um 58 Prozent verkraften [Oll06]. Für den gesamten europäischen Schienenverkehr wird bis zum Jahr 2020 eine Erhöhung der Personenkilometer um 40 Prozent und der Tonnenkilometer um sogar 70 Prozent im Vergleich zu 2000 prognostiziert. Das bedeutet, dass sich das Marktvolumen des schienenbasierten Passagier- und Güterverkehrs verdreifachen und der Anteil am Gesamtverkehrsmarkt damit verdoppeln würde [SRRA02].

Auch Elektrizitätsnetze werden immer stärker strapaziert: So hat sich die Last auf die europäischen Stromnetze seit den 1960er Jahren mehr als verdoppelt und ist damit stärker gestiegen als prognostiziert und als bei der Planung der Netze vorgesehen. Zudem sind die meisten Komponenten für eine Lebensdauer von höchstens 40 Jahren ausgelegt [SRAE07]. Dies äußert sich in einer zunehmenden Zahl von Stromausfällen, die sich vor allem in den USA häufen [Maz05, GW04]. Bis zum Jahr 2030 wird schließlich

## 1. Einführung

weiterhin von einem Wachstum des Stromverbrauchs um jährlich 1,4 Prozent allein in Europa ausgegangen [SRAE06].

Als besonders kritisch stellt sich die Kapazitätserhöhung für städtische Infrastrukturen dar: In der wachsenden Zahl sogenannter *Megacities* – Städten mit mehr als 10 Millionen Einwohnern – können Kapazitätserhöhungen in der Regel nur durch Steigerung der Effizienz der vorhandenen Infrastrukturen erreicht werden, da kaum Möglichkeiten zum physischen Ausbau gegeben sind. Eine von Siemens in Auftrag gegebene Studie kommt zu dem Schluss, dass der wichtigste Wettbewerbsvorteil einer solchen Megacity in Zukunft das effiziente Funktionieren ihrer Verkehrs- und Energieinfrastrukturen sein wird [EIU07].

Gleichzeitig ist eine *stärkere Integration und Interoperabilität* der Infrastrukturen gefordert. Dies ist einerseits eine Folge aus der Liberalisierung der nationalen Märkte: Die zunehmende Verteilung von Verantwortlichkeiten auf unterschiedliche Organisationen (im Schienenverkehr z. B. zwischen Infrastrukturbetreibern und mehreren Bahnbetriebsgesellschaften) führt zu erhöhtem Koordinationsbedarf zwischen den Beteiligten [GW04, VDE03]. In Elektrizitätsnetzen wird diese Situation durch die zunehmende dezentrale Energieerzeugung zusätzlich verschärft [DG04]. Andererseits wird auch die grenzüberschreitende Interoperabilität als Kernvoraussetzung angesehen, um die Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit von Infrastrukturnetzen zu erhöhen und Kostensenkungspotentiale zu realisieren [SRAE07, SRRA02, TK07].

Schließlich stellt sich grundsätzlich das Problem, eine *höhere Kosteneffizienz* bei der Bereitstellung zu erzielen. Denn einerseits stehen Infrastrukturen untereinander in Konkurrenz, wie z. B. das Schienennetz zum Straßennetz. Andererseits erzeugt die zunehmende Marktliberalisierung auch spürbar mehr Wettbewerb zwischen Infrastrukturbetreibern. Dies zwingt sie dazu, die Bedürfnisse ihrer Kunden besser zu erfüllen als ihre Mitbewerber. Dazu gehören die Erhöhung der Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit, aber vor allem auch die Senkung der Kosten durch effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen [RAC<sup>+</sup>07, Maz05, SRAE07, SRRA07]. Beispielsweise machen im Schienenverkehr allein die Kosten für die Instandhaltung der Infrastruktur etwa die Hälfte der Gesamtkosten für den Betrieb der Infrastruktur aus [SRRA07]. Jegliche Reduzierung dieser Kosten würde also nicht nur zu besserer Kosteneffizienz führen, sondern stellt auch Mittel bereit, die in die Erhöhung der Attraktivität des Schienenverkehrs investiert werden können. Für die Betreiber von Stromnetzen spielt vor allem eine Rolle, dass Regulatoren die Netznutzungsentgelte immer weiter senken werden, um den Wettbewerb zu erhöhen. Dies wird den Wert der Stromnetze senken und die Betreiber zu immer effizienterer Bewirtschaftung ihrer Netze zwingen [RAC<sup>+</sup>07].

Insgesamt stehen aktuell also alle materiellen Infrastrukturen vor der Herausforderung, auf Basis der vorhandenen Anlagen höhere Kapazitäten zur Verfügung zu stellen, sich zunehmend zu integrieren und gleichzeitig ihre Kosteneffizienz zu erhöhen.

**Strategien zur Bewältigung dieser Herausforderungen.** Strategien zur Begegnung dieser Anforderungen werden auf europäischer Ebene in Form sogenannter *Strategic Research Agendas* entwickelt. Im Zentrum stehen dabei ein besserer Informationsaustausch zwischen den Beteiligten sowie optimierte Wartung und Instandhaltung [SRAE07, SRRA07, For06, Oll06, VDE03, LS05].

Durch einen *besseren Informationsaustausch* zwischen beteiligten Organisationen bezüglich ihrer individuellen Kapazitäten wird beispielsweise im Schienenverkehr erwartet, dass das gesamte Netz effizienter genutzt und dadurch die Gesamtkapazität erhöht werden kann [IGR05]. Mittels eines besseren Informationsaustauschs soll zudem die grenzüberschreitende Integration enger und damit Versorgungssicherheit und eine weitere Kapazitätserhöhung erreicht werden [SRAE07].

Mit Hilfe von *optimierter Instandhaltung* soll vor allem Kosteneffizienz erreicht werden. Zentraler Ansatz ist hier die *zustandsorientierte Instandhaltung* (engl. *condition-based maintenance*): Anstatt wie bisher nach festen Zeitplänen vorzugehen (engl. *preventive maintenance*), werden Inspektionen und Wartungsarbeiten in Zukunft bedarfsgesteuert und nach belastungs- oder zustandsabhängigen Zeitplänen durchgeführt. Dies geht einher mit einer zunehmenden Automatisierung der (Fern-)Überwachung des Infrastrukturzustandes und der Wartungsarbeiten, wodurch personalintensive Tätigkeiten reduziert und damit auch der aufgrund der demographischen Entwicklung zunehmende Mangel an qualifizierten Experten besser bewältigt werden kann [SRRA07]. Darauf aufbauend lässt sich mittels *vorausschauender Instandhaltung* (engl. *predictive maintenance*) zudem die Ausfallsicherheit einer Infrastruktur als auch ihre Kapazität weiter erhöhen: Wenn auf Basis aktueller Zustandsdaten und Hintergrundwissens zukünftige Fehler und Ausfälle abzusehen sind, können Wartungsarbeiten entsprechend geplant werden, um die Beeinträchtigung der Infrastrukturnutzung zu minimieren und Ausfälle zu verhindern [SRRA07].

**Ansätze zur Umsetzung der Strategien.** Grundvoraussetzung zur Umsetzung all dieser Strategien ist präzises Wissen über den aktuellen technischen Zustand der Infrastruktur. Dies stellt sich in der Realität als sehr schwieriges Problem dar: Zwar ist bereits heute eine Vielzahl von Fernüberwachungssystemen im Einsatz, die Unmengen an Daten produzieren und von unterschiedlichen Organisationen betrieben werden. Diese Daten beschreiben jedoch isolierte Phänomene und werden in der Regel lokal und unabhängig voneinander ausgewertet. Deshalb ist es heute nicht möglich, auf Basis der vorhandenen Daten einen aktuellen und komplexen Gesamtzustand abzuleiten und für die verschiedenen Komponenten der Infrastruktur anzugeben. Die Situation lässt sich mit einem Zitat von John Naisbitt aus seinem Bestseller *Megatrends* von 1984 pointiert auf den Punkt bringen: „Wir ertrinken in Informationen, aber hungern nach Wissen“ [Nai84].

Mehrere Forschungsprojekte und Initiativen versuchen zur Zeit, unter Schlagwörtern wie *Intelligent Infrastructures*, *Smart Infrastructures* und *Smart Grids* Lösungsansätze für diese Problematik zu entwickeln.

So hat das britische Foresight-Projekt<sup>1</sup> *Intelligent Infrastructure Systems* mit dem Schwerpunkt Verkehrsinfrastrukturen mögliche Beiträge von Wissenschaft und Technik untersucht. Als einer der drei Haupttreiber für die nächsten 50 Jahre wird dabei – neben Energie und Rohstoffen – die Umgebungszintelligenz (*Ambient Intelligence*) gesehen,

---

<sup>1</sup>Die britische Regierung betreibt mit dem sogenannten Foresight-Programm wissenschaftliche Zukunftsforschung als Grundlage für politische Entscheidungen. Informationen zum Foresight-Projekt *Intelligent Infrastructure Systems* (2004-2006) findet man unter [http://www.foresight.gov.uk/Previous\\_Projects/Intelligent\\_Infrastructure\\_Systems/](http://www.foresight.gov.uk/Previous_Projects/Intelligent_Infrastructure_Systems/).

## 1. Einführung

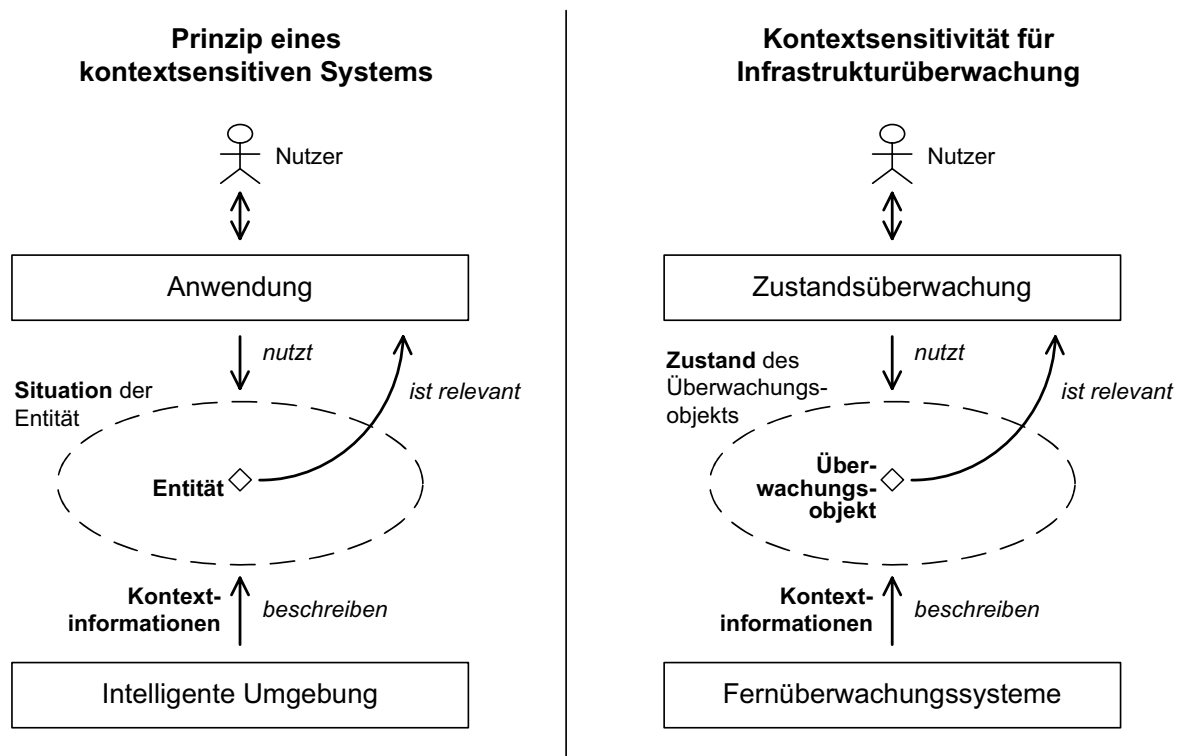


Abbildung 1.1.: Illustration des Prinzips kontextsensitiver Systeme (links) und seine Übertragung auf die Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze (rechts).

also die Durchdringung der realen Welt mit vernetzten Sensoren, Aktuatoren und Prozessoren. Auf dem Gebiet der Schienennetze beschäftigt sich das europäische Projekt *InteGRail* (*Intelligent Integration of Railway Systems*) mit europaweiter Interoperabilität, um dadurch präziseres Zustandswissen zu erreichen [IGR05]. Auf dem Gebiet der Elektrizitätsnetze werden in weiteren europäischen Projekten IT-Systeme vorgeschlagen und entwickelt, um Netze für dezentrale Energieerzeugung aufzurüsten [DG04] und Entscheidungsunterstützung für Netzbetreiber anzubieten [SLW<sup>+</sup>07]. In den USA wurde die *GridWise*-Initiative gegründet, um unter dem Stichwort *Smart Energy* Lösungen für höhere Zuverlässigkeit und Effizienz von Stromnetzen voranzutreiben [GW04, Maz05].

**Ansatz dieser Arbeit.** Eine Analyse der Anforderungen an die Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze offenbart die Verwandtschaft zu *kontextsensitiven Systemen*, wie sie bei Anwendungen der *Ambient Intelligence* und des *Ubiquitous Computing* eingesetzt werden. Das Prinzip kontextsensitiver Systeme nach Dey [Dey01] ist in Abbildung 1.1 auf der linken Seite illustriert: Eine kontextsensitive Anwendung unterstützt den Nutzer bei der Bewältigung einer Aufgabe, indem sie Kontextinformationen auswertet, um ihn mit hilfreichen Informationen und Diensten zu versorgen. Diese Kontextinformationen beziehen sich auf *Entitäten*, die für die Aufgabe relevant sind. Entitäten umfassen Personen, Orte sowie Dinge. *Kontextinformationen* (auch: *Kontext*) sind definiert als beliebige Informationen, die die Situation einer solchen Entität beschreiben. Sie werden

typischerweise von Sensoren erfasst, wie sie in intelligenten Umgebungen (engl. *smart environments*) eingesetzt werden.

Dieses Prinzip lässt sich wie folgt auf die Zustandsüberwachung bei Infrastrukturnetzen übertragen (siehe rechte Seite von Abbildung 1.1): Hier stellt die Infrastrukturüberwachung die Anwendung dar, die Kontextinformationen auswertet, um den Nutzer mit hilfreichen Informationen zu versorgen. Die relevanten *Entitäten* sind in diesem Fall die Überwachungsobjekte. Abhängig von der Anwendung können dies Infrastrukturkomponenten unterschiedlicher Granularität sein – im Schienenverkehr beispielsweise von der einzelnen Achse bis zum gesamten Zug. Die kontextsensitive Zustandsüberwachung benötigt *Kontextinformationen* zu diesen Überwachungsobjekten, wozu alle Informationen zählen, die ihren Zustand beschreiben. Diese werden in Infrastrukturnetzen typischerweise ebenfalls von Sensoren geliefert, die in Fernüberwachungssystemen eingesetzt werden. Auch andere relevante Informationen wie Umwelt- und Wetterdaten zählen dazu.

Während die Problemstellung bei der Zustandsüberwachung also der Problemstellung bei kontextsensitiven Systemen entspricht, werden in beiden Domänen jedoch *unterschiedliche* Ansätze zu ihrer Lösung verfolgt: Traditionelle Systeme zur Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze betrachten die Daten der verschiedenen Fernüberwachungssysteme isoliert voneinander. Werden in Einzelfällen ausgewählte Überwachungssysteme integriert, so beruht diese Integration auf Ad-hoc-Verfahren, die jedes Mal neu entwickelt werden müssen. Kontextsensitive Systeme verfolgen hingegen zunehmend generische Ansätze, die auf formaler Wissensrepräsentation und -verarbeitung basieren. Hier wird differenziert zwischen dem anwendungsabhängigen Wissensmodell, das die Semantik der Kontextinformationen formalisiert, und der anwendungsunabhängigen Verarbeitungslogik. Dadurch wird die Integration von Kontextinformationen und die Erweiterung um zusätzliche Kontextinformationen stark vereinfacht.

Ausgangsidee dieser Arbeit ist deshalb, den wissensbasierten Ansatz kontextsensitiver Systeme auf die Zustandsüberwachung bei Infrastrukturnetzen zu übertragen. Weil Interoperabilität, die Berücksichtigung komplexer Zusammenhänge und Wartbarkeit hier sogar stärker im Vordergrund stehen, ist dieser Ansatz dafür besonders vielversprechend.

Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren wichtige Fortschritte auf dem Gebiet der formalen Wissensrepräsentation und -verarbeitung (engl. *knowledge representation and reasoning*) erzielt, die diesem Ansatz zugute kommen. Erste Grundlagen wurden unter anderem von Minsky mit seinem Frame-Ansatz bereits im Jahr 1975 gelegt [Min75]. Schnell stellte sich jedoch heraus, dass eine höhere Ausdrucksstärke der Repräsentationssprache zwangsläufig mit einer höheren Berechnungskomplexität der automatisierten Verarbeitung einher geht. Das ist einer der Gründe, weshalb diese Formalismen lange Zeit trotz ihrer vielversprechenden Eigenschaften nur beschränkt praktisch einsetzbar waren. Angefangen mit der Entwicklung erster Beschreibungslogiken (engl. *Description Logics*, DL) [BCM<sup>+</sup>03] begann sich die Situation zu ändern: Nun wurde die Abhängigkeit zwischen Ausdrucksstärke und Berechnungskomplexität gezielt untersucht und Repräsentationssprachen mit den gewünschten Eigenschaften wurden konstruiert. Beschreibungslogische Wissensmodelle werden auch als (*formale*) *Ontologien* bezeichnet.

Einen enormen Schub erfuhr diese Art der Wissensrepräsentation durch die *Seman-*

## 1. Einführung

*tic Web*-Initiative des *World Wide Web Consortiums* (W3C) [SW08]: Die Vision des Semantic Web besteht darin, die Semantik von Webseiten und -diensten formal zu repräsentieren, um sie für Maschinen zugänglich und damit automatisiert auswertbar zu machen. Dadurch soll das Finden relevanter Informationen vereinfacht und vielfältige Verknüpfungen ermöglicht werden [BLHL01]. Konkret wurde dafür im Jahr 2004 die *Web Ontology Language* (OWL) auf Basis einer bestimmten Beschreibungslogik spezifiziert und als W3C-Standard veröffentlicht. Die Verfügbarkeit einer Ontologiebeschreibungssprache als Standard einer einflussreichen Organisation – wie des W3C – hat vielfältige Synergien ermöglicht: Sie hat sich nicht nur im klassischen Web-Umfeld etabliert, sondern wurde auch für andere Anwendungen der Wissensrepräsentation und -verarbeitung übernommen. Dank dieses Standards entsteht zur Zeit eine Vielzahl von Entwicklungswerkzeugen (Editoren) und Software-Komponenten zur Verarbeitung dieser Daten (Reasoner, Triple Stores), die für die Realisierung wissensbasierter Systeme auf Basis von OWL genutzt werden können. Schließlich steigt auch die Zahl der verfügbaren, qualitativ hochwertigen Ontologien, die sich zur Wiederverwendung eignen.

Aus diesen Gründen verfolgt diese Arbeit für die Zustandsüberwachung bei Infrastrukturnetzen also einen wissensbasierten Ansatz, wie er sich bei den eng verwandten kontextsensitiven Systemen bereits bewährt hat. Begünstigt wird die praktische Umsetzbarkeit dieses Ansatzes zusätzlich von aktuellen Fortschritten bei der formalen Wissensrepräsentation und -verarbeitung im Umfeld des *Semantic Web*. Insgesamt sollen mit diesem Ansatz Grundlagen geschaffen werden, mit denen präzises Wissen über den aktuellen Zustand von Infrastrukturkomponenten gewonnen werden kann. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um die beschriebenen Herausforderungen an Infrastrukturnetze der Zukunft bewältigen zu können.

### 1.1. Aufgabenstellung und Ziele

Ausgangsidee für diese Arbeit ist das Verständnis der Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze als kontextsensitives System. Sowohl Daten von Überwachungssystemen als auch alle anderen Daten, die zur Zustandserkennung relevant sind, werden einheitlich als Kontextinformationen angesehen. Ziel der Arbeit ist es, auf Basis von *Semantic Web*-Technologien allgemeingültige Verfahren zur Integration und Auswertung von Kontextinformationen zu konzipieren und umzusetzen, mit denen komplexe Zustände von Infrastrukturkomponenten erkannt werden können. Dabei muss den besonderen Anforderungen der Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze Rechnung getragen werden.

Dazu werden folgende Fragestellungen bearbeitet und entsprechende Lösungsbeiträge entwickelt:

- Welche Eigenschaften besitzen Kontextinformationen und Zustände in Infrastrukturnetzen, und wie können diese geeignet modelliert werden? Welchen Anforderungen müssen diese Modelle zum Zweck der Infrastrukturüberwachung genügen, und wie kann dies sichergestellt werden?
- Welche Besonderheiten von Infrastrukturnetzen müssen bei der automatisierten

Auswertung der im Modell formalisierten Semantik berücksichtigt werden? Welche Anfragen müssen unterstützt werden, und mit welchen Verfahren kann dies effizient erreicht werden?

- Wie lassen sich die entwickelten Verfahren in der Praxis umsetzen? Wie sehen Systemarchitekturen aus, die die Anforderungen der Infrastrukturüberwachung erfüllen, und welche Komponenten und Schnittstellen sind dafür erforderlich?

Im Zentrum dieser Arbeit steht somit ein generisches Konzept zur Formalisierung der Semantik von Kontextinformationen und Zuständen in Infrastrukturnetzen sowie Verfahren zu deren Auswertung. Dies schließt die Entwicklung einer geeigneten generischen Systemarchitektur und ausgewählte Umsetzungen sowie die Anwendung auf bestimmte Infrastrukturdomänen ein. Dabei soll auf bestehenden Standards der *Semantic Web*-Initiative des W3C aufgebaut werden, um die Umsetzbarkeit und Zukunftsträchtigkeit der Konzepte zu gewährleisten.

Nicht Teil der Aufgabenstellung ist es, ein integriertes Überwachungssystem für eine bestimmte Infrastrukturdomäne vollständig zu realisieren. Dazu müssten konkrete Überwachungssysteme und ihre Schnittstellen, Kommunikationstechnologien und andere Aspekte, wie z. B. Informationssicherheit, im Detail untersucht werden. Zur Modellierung sollen aus den genannten Gründen die bestehenden *Semantic Web*-Standards des W3C verwendet werden. Die Evaluierung darüber hinaus gehender Wissensrepräsentationssprachen bezüglich ihrer Modellierungseigenschaften wäre Thema einer eigenständigen Arbeit.

## 1.2. Vorgehensweise und Gliederung

Zur Erreichung der oben erläuterten Ziele wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Diese spiegelt sich auch in der Gliederung der Arbeit wieder.

Zunächst wird das Gebiet der Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze anhand der repräsentativen Beispiele Schienen- und Stromnetz analysiert (Kapitel 2). Es zeigt sich, dass die Kernanforderungen übereinstimmen und sich damit generische Anforderungen an die Zustandsüberwachung für Infrastrukturnetze ableiten lassen.

Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen wird das Gebiet der formalen Wissensrepräsentation eingeführt (Kapitel 3). Dabei ergibt sich, dass die deklarative Wissensrepräsentation auf Basis von Beschreibungslogiken aufgrund ihrer hohen Ausdrucksstärke im Verhältnis zur Verarbeitungskomplexität sowie der attraktiven Wartbarkeits- und Erweiterbarkeitseigenschaften einen vielversprechenden Formalismus für die Zustandsüberwachung darstellt.

Bei der Erstellung von Wissensmodellen für die Infrastrukturüberwachung (Kapitel 4) führen klassische Methodiken jedoch nicht zum Ziel, da das zu formalisierende Wissen über mehrere Domänenexperten verteilt ist und diese in der Regel nicht über die nötige Modellierungskompetenz verfügen. Um Domänenexperten dennoch in die Lage zu versetzen, qualitativ hochwertige Teilmodelle eines konsistenten Gesamtmodells zu erstellen, konzipiert diese Arbeit Entwurfsmuster für die Modellierung von Kontextinformationen und Infrastrukturzuständen. Dazu wird auf etablierten und bewährten Standards für die Zustandsüberwachung technischer Systeme aufgebaut.