

Um zu verstehen, wie autonome Fahrzeuge mit ihren Umgebungen interagieren und dabei Optionen ihres Verhaltens entwerfen, hilft ein Blick auf die Architektur autonomer Fahrzeuge. Abbildung 7.1 stammt aus einem Forschungsprojekt der TU Braunschweig und zeigt in abstrahierter Form eine solche Architektur.<sup>39</sup> Ihre Grundstruktur bildet die Unterscheidung in eine strategische, eine taktische und eine operationale Ebene, die den drei oberen Zeilen entsprechen. Darunter liegt die Ebene der sensorischer Datensammlung sowie der Umsetzung von Manövern. Während die strategische Ebene die Navigation des Autos zwischen zwei Orten betrifft und die operationale Ebene die Ausführung von Fahrmanövern, wird auf der taktischen Ebene das Auto in seiner Umgebung verortet und die Situation analysiert. Während auf allen Ebenen notwendigerweise Algorithmen im Spiel sind, bestehen diese auf der strategischen Ebene im Berechnen von Routen, auf der operationalen Ebene im Steuern und Manövrieren des Fahrzeugs, auf der taktischen Ebene hingegen im Erstellen einer Probabilistik möglicher Welten und der entsprechenden Handlungsoptionen.

In der Abbildung ist zu sehen, wie die sensorischen Daten in das Modul des »Feature Abstraction and Model-Based Filtering« und von dort aus weiter in »Context/Scene Modeling« sowie »Road-Level Environmental Modeling« fließen. Dem entsprechen auf der linken Seite unter den extern zugespielten Daten etwa über Straßenkarten oder die Verkehrslage drei Ebenen des *world modelings*. *Modeling* – ob von Welten oder von Szenen – ist in diesem Kontext nicht die vollständige Repräsentation der Außenwelt gleichsam im Geist der Maschine, sondern das Zusammensetzen von fragmentierten Sensordaten zu einem viablen, d.h. operationsfähigen Modell der für das System wichtigen Umgebungsfaktoren.

## 7.2 Operationalisierungen der Unsicherheit

Das Modellieren der Umgebung auf der taktischen Ebene kann mit der algorithmischen Verarbeitung von Umgebungsdaten allein nicht erklärt werden, denn die berechneten Wahrscheinlichkeitswerte – über nichts anderes als über Wahrscheinlichkeiten verfügt das Auto – enthalten immer Unwahrscheinlichkeiten und damit mögliche andere Welten, ergo jene alternativen Optionen, die die Voraussetzung seiner Autonomie sind. Das *scene model* entspricht der Wahrscheinlichkeit möglicher Zustände der Umgebung, die stets auch anders sein könnten. Es ist virtuell und operational zugleich. Durch diese Virtualität, in der Wahrscheinlichkeit und Möglichkeit aneinander gekoppelt sind, wird die Vergangenheit ausgewertet, um die Zukunft zu antizipieren und in der Gegenwart zeitkritische Entscheidungen

---

<sup>39</sup> Im Kontext dieses Forschungsprojekts war das selbstfahrende Auto Leonie 2010 das erste Fahrzeug, das auf öffentlichen Straßen fahren durfte – mit einem menschlichen Begleiter.

zu treffen, die diese Zukunft eintreten lassen oder verhindern. Die Autonomie solcher Systeme besteht darin, sich an ihr *environment* adaptieren zu können, weil sie aufgrund ihrer probabilistischen Operationsweisen mit Weltmodellen arbeiten, die auch anders sein könnten und damit die Möglichkeit eröffnen, überhaupt – und damit potentiell anders – zu entscheiden. Diese Offenheit ist die Grundlage ihrer relationalen Verschränkung mit dem *environment*. Das *environment* dieser Technologien ist zugleich relational und probabilistisch – und es kann sich jederzeit ändern. Ein autonomes Fahrzeug ist an eine nicht-determinierte Pfadabhängigkeit gebunden: Dass das System mehrere Lösungen zur Auswahl hat, garantiert sein Fortbestehen, weil es nicht auf einen determinierten Weg festgelegt ist, aber durch seine Kopplung nur bestimmte Möglichkeiten offenstehen.

Diese Offenheit besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeiten der Zustände des *environments*, mit denen das System operiert, ihre Unwahrscheinlichkeit als Möglichkeit in sich tragen. Aus technischer Sicht ist ein Wahrscheinlichkeitswert eindeutig und kann als Grundlage erfolgreicher und zuverlässiger Operationen dienen – dass autonome Fahrzeuge weniger Unfälle machen als menschliche Fahrer zeigt dies. Die Unsicherheit des *environments* resultiert in Verfahren der Adaption an diese Unsicherheit, die das autonome System immer stärker mit seinem *environment* verschränken, um es von diesem zu lösen. Als ökologische Relation formuliert: Desto unabhängiger ein autonomes System wird, desto abhängiger wird es. Die technischen Verfahren der Adaption resultieren in diesem Sinn in ökologischen Relationen der Un-/Abhängigkeit. Ein Blick auf die in der Robotik um 1990 entworfene Konzeption von Unsicherheit soll deren Operationalisierung abschließend in den Mittelpunkt stellen.

Die zugrundeliegenden Verfahren der Probabilistik entstehen, wie bereits angedeutet, um 1990 als Antwort auf die Herausforderungen, die insbesondere neue Sensoren bzw. Verarbeitungsalgorithmen an die Robotik stellen. In seinem maßgeblichen Aufsatz »Uncertain Geometry in Robotics« von 1988 setzt der Ingenieur Hugh F. Durrant-Whyte folgerichtig mit der Annahme ein, dass das *environment* eines Roboters unsicher und unvorhersagbar sei.<sup>40</sup> Sein Aufsatz steht stellvertretend für die Versuche dieser Zeit, Unsicherheit probabilistisch durch Algorithmen prozessierbar zu machen. In diesem Kontext wird auch die Unvorhersagbarkeit des *environments* genauer gefasst. Unsicherheit kann in diesem Kontext zweierlei bedeuten: das Nicht-Wissen des Roboters über seine Position und die Unvorhersagbarkeit der Dynamik des *environments*. Diese Doppelung bildet den epistemologischen Kern der neuen Verfahren, die Teil einer bis in die Gegenwart reichenden Transformation von Epistemologien des Umgebens sind.

Die Konfrontation eines autonomen Roboters mit der doppelten Unvorhersagbarkeit der Welt erfordert Durrant-Whyte zufolge eine Optimierung weniger von

---

<sup>40</sup> Durrant-Whyte: »Uncertain Geometry in Robotics«.

dessen kognitiven und symbolverarbeitenden Kapazitäten als vielmehr von ökologischen Relationen der Un/Abhängigkeit. Mit diesen Herausforderungen kann die Robotik erst umgehen, als es zu dieser Zeit technisch möglich wird, Roboter auch in industriellem Ausmaß nicht nur in den kontrollierten *environments* von Laboren oder Fabrikhallen zu determinierten Aufgaben einzusetzen: »Increasingly, however, robots are being used to recognize objects and environments which are not known *a priori* and to execute motions which are not predetermined. In these cases an *implicit* allowance for uncertainty is not enough, we must *explicitly* represent errors and have an understanding of how they affect the geometric analysis leading to recognition, manipulation and motion.«<sup>41</sup> Unsicherheit soll also Teil der Operationen des Roboters werden. Die Ersetzung von Eindeutigkeit und sicherem, repräsentationalem Wissen durch Probabilistik, die heute die technische Grundlage autonomer Fahrzeuge bildet, ist also kein Versuch, Unsicherheit zu eliminieren, sondern sie im Gegenteil durch die Verwandlung in Wahrscheinlichkeitswerte operationsfähig zu machen. Zu diesem Zweck erarbeitet die avancierte Robotik dieser Zeit die erläuterten Verfahren, um aus Unsicherheit über die Lokalisierung durch den Vergleich von Sensordaten vor und während der Bewegung des Roboters Wahrscheinlichkeiten zu extrahieren und ein *world model* des *environments* anzulegen, das stets mehrere Optionen des Verhaltens enthält. Dies impliziert, dass das *environment* zwar unvorhersagbar ist – »inherently uncertain«<sup>42</sup> –, aber durch probabilistische Verfahren beherrschbar genug, um mit einer »explicit representation of uncertain geometry«<sup>43</sup> zuverlässig in ihm zu operieren. Damit verbunden ist eine Ausrichtung auf die Zukunft, in der die Unerwartbarkeit liegt.

Das *environment* ist mithin als Verteilung von Wahrscheinlichkeitswerten für den Roboter, die Drohne oder das Fahrzeug eine strukturelle Quelle von Unsicherheit und Unerwartbarkeit. Unsicherheit und Unerwartbarkeit verhindern Autonomie nicht, sondern sind die Voraussetzung für die Adoptionsfähigkeit des Systems an sich ständig wandelnde Umgebungen. Nur dadurch kann die Dynamik des Systems aufrechterhalten werden. Ohne dass dieser Konnex in den zitierten Texten hergestellt würde, spiegelt diese Annahme über das *environment* die Strategien der Resilienz, die von C.S. Holling Mitte der 1970er Jahre formuliert werden, aber erst etwa um 1990 die Grenzen der Ökologie überschreiten. In beiden Kontexten zeigt sich ein neues und bis heute wirksames Verständnis des *environments*. Das *environment* ist für Holling ein Faktor der Fluktuation, Unsicherheit und Kontingenz, der von den umgebenen und koevolutiv mit ihm verschrankten Organismen ein hohes Maß an Adaption und die Herausbildung von Kapazitäten der Absorption von

<sup>41</sup> Ebd., S. 851. Hervorhebungen im Original.

<sup>42</sup> Ebd.

<sup>43</sup> Ebd.

Unsicherheit erfordert, um nach einer Störung neue Schwellenwerte der temporären Stabilität zu erreichen. Das *environment* tritt dabei nicht als determinierender Faktor auf, sondern als reziproker Auslöser von Adaption. Während es bei Holling darum geht, komplexen Systemen angesichts der Unvorhersagbarkeit des *environments* Resilienz anzutrainieren, setzt die Robotik um 1990 dazu an, technische Systeme der autonomen Adaption zu entwickeln, die Unsicherheit zur Grundlage ihrer Probabilistik machen. Beide Tendenzen, so wird nun deutlich, sind Teil einer erneuten Transformation des Begriffs, die eine Veränderung der epistemologischen Verhältnisse von Umgebendem und Umgebenem impliziert und schließlich in der Gegenwart technisch etabliert wird.

Wenn, wie am Ende des dritten Kapitels ausgeführt, das Sicherheitsdispositiv der Gegenwart auf der Durchsetzung von Verhaltensdesigns und Politikmodellen der Resilienz beruht, und wenn im Fall selbstfahrender Autos die Adaption an fluktuierende Zustände des *environments* sowie die Herausbildung entsprechender Kapazitäten der Absorption von Schwankungen ein zentraler Entwicklungsschritt autonomer Technologien sind, dann wird die Bedeutung dieser epistemologischen Verschiebung des *environments* deutlich. Auch autonome Fahrzeuge unterliegen einem »designing for uncertainty«<sup>44</sup>, denn ihre Offenheit, sich anders verhalten zu können, ist die Voraussetzung ihrer reziproken Verschränkung mit dem *environment* und damit ihrer Autonomie. Würden sie nicht mit Wahrscheinlichkeiten, sondern mit determinierten Reaktionen auf vorgegebene Reize operieren, könnten sie nicht flexibel und adaptiv interagieren. Wenn Adaption an Unvorhersagbarkeit und Unsicherheit in der Herausbildung von Resilienz resultiert, dann stellen autonome Technologien eine Form implementierter Resilienz dar. Sie sind Instanzen einer Biopolitik, die auf Unsicherheit gründet, sie nutzbar macht und Adaption zum Imperativ wie zum technischen Operationsmodus erhebt.

Auf diese Weise werden die Unvorhersagbarkeit und ergo Unsicherheit des *environments* sowie die Modelle der resilienten Krisenbewältigung nicht nur zum Verhaltensimperativ an flexible, widerstandsfähige Subjekte erhoben, sondern auch als Funktionsprinzip technischer Adaption an unvorhersagbare *environments* etabliert. Die Autonomie derartige Subjekte bzw. technischer Systeme besteht in ihren ökologischen Relationen: sie sind in dem Grad unabhängig von ihrer Umgebung, in dem sie von ihr abhängig sind. Wird diese Umgebung der ökologischen Relation als konstitutiv unsicher definiert und zugleich Autonomie von den Potentialen der Adaption her begriffen, dann kann ein Subjekt bzw. ein technisches System nur noch autonom sein, wenn es die Unsicherheit seines *environments* internalisiert. In dieser Konzeption gibt es keine Adaption ohne Unsicherheit, also kein Verhalten ohne den Umgang mit Unvorhersagbarkeit. Die Verantwortung für Krisenresistenz, Anpassungsfähigkeit und letztlich Überleben wird im Individuum

---

44 Holling (1978): *Adaptive Environmental Assessment and Management*. S. 138.

situiert, das seinem *environment* weder gegenübersteht noch von ihm determiniert wird, sondern dessen Unsicherheit teilt.

Regierung durch Regulation der Zirkulation, so wie sie Michel Foucault für das Sicherheitsdispositiv des *milieus* beschrieben hat, wird unter der Ägide der Resilienz zur Regierung durch Adaption an unsichere *environments*. Adaption bedeutet hier Anpassung an Unvorhersagbarkeit und Unsicherheit. Sie umfasst nicht mehr nur Organismen, sondern auch Maschinen. Wenn diese Maschinen wiederum zu allumfassenden *environments* von Menschen werden, zu einer »originary environmental condition«<sup>45</sup>, dann werden künstliche Umgebungen zur Grundlage einer Biopolitik, die das Lebendige durch Umgebungsrelationen zu gestalten vermag. Dabei erscheint »uncertainty as a fundamental facet of environmental life rather than as a distasteful transition to attainable certainty«<sup>46</sup>. Foucaults Frage ›Wie nicht auf diese Weise und nicht um diesen Preis regiert werden?‹ könnte man heute in zwei unterschiedliche Fragen umformulieren: ›Wie nicht vom *environment* determiniert werden?‹ und ›Wie sich nicht auf diese Weise adaptieren?‹.<sup>47</sup> Doch so wenig es ein Leben ohne Regierung und Regulation gibt, so wenig gibt es ein Leben ohne Umgebung und ohne Adaption. Es gibt, in anderen Worten, keine unumgebene Umgebung und keinen Ausstieg aus Umgebungsrelationen.

### 7.3 Am Ende: Unbequeme Begriffe und unsichere *environments*

Die erläuterten technischen Verfahren der Lokalisierung, Sensorik und Probabilistik sorgen für die Unabhängigkeit adaptiver Umgebungstechnologien, indem sie diese immer stärker an ihr *environment* binden und die Abhängigkeit steigern. In dieser ökologischen Relation bringen die Umgebungstechnologien autonomer Fahrzeuge mit unterschiedlichen Verfahren Verhältnisse des Umgebens hervor, indem sie sich in ihren *environments* bewegen. Das bedeutet jedoch noch nicht, dass es zu ihrem Verständnis reicht, sie als Ökologien zu bezeichnen und deren Modelle und Metaphern in Anschlag zu bringen, denn damit ist über die Spezifik ihrer Relationen noch nichts gesagt. Erst wenn man rekonstruiert, wie diese Relationen gestaltet werden, kann man anhand ihrer Abhängigkeiten und Unabhängigkeiten nachzeichnen, wie durch die Hervorbringung von Umgebungsrelationen in konkreten technischen Konstellationen *environments* zu Objekten der Adaption werden und Macht auf Umgebenes durch Umgebendes ausgeübt wird. Einige Einblicke in die historische Vielfalt solcher Machtkonstellationen hat dieses Buch für den Begriff *environment* durchgespielt.

45 Hansen: »Ubiquitous Sensation«. S. 84.

46 Holling (1978): *Adaptive Environmental Assessment and Management*. S. 139.

47 Vgl. Foucault, Michel (1996): *Was ist Kritik?* Berlin, Merve. S. 12.