

7 Schluss – Die Unsicherheit des *environments*

Environments sind, so kann man an dieser Stelle festhalten, Räume, in denen im Verlauf des 20. Jahrhunderts das Umgebene durch unterschiedliche Verfahren der Gestaltung ökologischer Relationen mit dem Umgebenden zum Einsatzpunkt einer Biopolitik geworden ist. Die Instrumente dieser Biopolitik stellen Relationen des Umgebens und die Wechselwirkungen zwischen beiden Seiten dar, in die mit den beschriebenen Verfahren des *environmental designs*, des *environmental engineering*s und des *environmental managements* auf sehr unterschiedliche Weise eingegriffen werden kann. Das *environment* gilt in den einschlägigen Debatten entsprechend als ein Ort der Zirkulation und der Regulation. Diese Konzeption wird zunächst in der akademischen Ökologie ab 1970 schrittweise von der Annahme der Unsicherheit und Unvorhersagbarkeit des *environments* überblendet, die schließlich über den Resilienz-Begriff auch Eingang in die Politik, die Pädagogik und die Psychologie findet. Zirkulation und Regulation verschwinden damit nicht als Instrumente der Biopolitik, sondern werden von Verfahren der Adaption an die Unvorhersagbarkeit des *environments* ergänzt. Ein Ökosystem kann demnach nicht mehr als ein harmonischer Zusammenhang der Stabilität beschrieben werden. Vielmehr erfordern die Unsicherheit des *environments* und die Fluktuation seiner Faktoren eine ständige Adaptionsleistung von den umgebenen Organismen, die nie in einer dauerhaft stabilen Relation stehen können. Adaption ist ein unabschließbarer dynamischer Prozess.

Die Herausbildung der verschiedenen Stadien und Ausprägungen dieser Biopolitik kann nicht von jenen Epistemologien des Umgebens gelöst werden, die in unterschiedlichen historischen Kontexten die Kausalitäten von Wechselwirkungen verhandeln, die als ökologische Relationen gelten. Wie die Beispiele des letzten Kapitels vorgeführt haben, bedingen sich das Wissen um ökologische Relationen und die Möglichkeiten ihrer Gestaltung gegenseitig. Diese Verschränkung hat das Buch bis hierhin nachverfolgt und damit gezeigt, wie der zunächst etwas Anti-Artifizielles bezeichnende Begriff *environment* im Kontext ökologischer und physiologischer Forschung die Seiten gewechselt hat: *Environments* sind im Verlauf dieser Geschichte zu synthetischen, technischen und gestaltbaren Umgebungen geworden, die noch dort, wo sie in der jüngsten Tendenz als Quellen der Unsicherheit

beschrieben werden, die Trennung in Natürliches und Künstliches unterlaufen. Der Begriff steht also nicht mehr in Opposition zum Gemachten, ist aber auch nicht länger vorrangig als Gegenstand regulierender Eingriffe in die Zirkulation definiert. Vielmehr legt die Unsicherheit des *environments* die Adaption des Umgebenen nahe, um flexibel und resilient auf ständige, unerwartbare Veränderungen und zukünftige Ereignisse zu reagieren. Zum Abschluss dieses Buches und als Sprung in die Gegenwart soll es darum gehen, wie in der Entwicklung autonomer, adaptiver Technologien – am Beispiel selbstfahrender Autos – Verfahren des Umgangs mit der Unsicherheit des *environments* etabliert werden. Adaption wird dabei zu einem Prinzip der Autonomie technischer Systeme, die in der Lage sind, mit ihrer Umgebung zu interagieren.

In der letzten Dekade ist in dieser Hinsicht parallel zum Wiederaufstieg der Ökologie als Selbstverständigungskonzept des Anthropozäns eine Ausweitung zu beobachten, in der im Raum verteilte, vernetzte, sensorisch aufgerüstete, sogenannte smarte Technologien immer mächtiger werden: ein »movement of computation out of the box and into the environment«.¹ In unterschiedlichen Kontexten lösen sich digitale Technologien unter Namen wie Internet der Dinge, *ubiquitous computing* oder Smartphone, aber auch in Form von autonomen Technologien wie Robotern, Drohnen und selbstfahrenden Autos von ihrer Kopplung an bestimmte Orte und erschließen die sie umgebenden Räume als *environments*. Sie unterliegen dem, was Orit Halpern, Robert Mitchell und Bernard Geoghegan »environmentally extended smartness«² genannt haben und machen Umgebungsrelationen nutzbar, um kontextabhängig, sensitiv und zeitkritisch auf Veränderungen ihrer Umgebung zu reagieren. Diese Technologien können unterschiedliche Gestalt annehmen: Wie an anderer Stelle ausgeführt, werden im Internet der Dinge Veränderungen der Umgebung des jeweiligen Objekts durch Sensoren und die Vernetzung zusammengehöriger Objekte registriert und zur Bereitstellung von Services genutzt.³ Im *ubiquitous computing* dient die Lokalisierung eines Geräts in begrenzten Räumen zur Relationalisierung zu anderen Geräten.⁴ Passive RFID-Chips werden

1 Hayles, N. Katherine: »RFID. Human Agency and Meaning in Information-Intensive Environments«. In: *Theory, Culture & Society* 26/2-3 (2009), S. 47-72. Hier: S. 48. Vgl. zum »becoming environmental of computation« auch Gabrys (2016): *Program Earth*. S. 4 sowie Hayles, N. Katherine (2017): *Unthought. The Power of the Cognitive Nonconscious*. Chicago, University of Chicago Press.

2 Halpern/Mitchell/Geoghegan: »The Smartness Mandate«. S. 108.

3 Vgl. Engemann, Christoph/Sprenger, Florian: »Das Netz der Dinge. Zur Einleitung«. In: ders./ders. (Hg., 2015): *Internet der Dinge. Über smarte Objekte, intelligente Umgebungen und die technische Durchdringung der Welt*. Bielefeld, transcript, S. 7-57.

4 Sprenger, Florian: »Die Zukunft der Vergangenheit. Kommentar zu »The Coming Age of Calm Technology««. In: Engemann, Christoph/ders. (Hg., 2015): *Internet der Dinge. Über smarte Objekte, intelligente Umgebungen und die technische Durchdringung der Welt*. Bielefeld, transcript, S. 73-87. Vgl. auch McCullough, Malcolm (2005): *Digital Ground. Architecture, Pervasive Computing, and Environmental Knowing*. Cambridge, MIT Press. S. 74f.

in Logistikketten durch die räumliche Nähe des Induktionsfelds eines Transmitters aktiviert und erlauben das Tracking von Waren in Relation zu vorab definierten Orten.⁵ GPS-Empfänger nutzen den Konvergenzpunkt der Signallaufzeit von mindestens drei Satelliten zur relationalen Ortsbestimmung.⁶ Das Mobilfunknetz zeichnet aus, dass in ihm die Positionen aller Teilnehmer nicht trotz, sondern aufgrund ihrer Bewegung in Relation zu Sendemasten konstant registriert werden.⁷ Automatisierte Verkehrsmittel von Autos über Drohnen bis hin zu Robotern sollen durch die Verzahnung von Sensorik, Algorithmen, Machine Learning und Motorik zur Adaption an unvorhersagbare Umgebungen in der Lage sein. Zu diesem Zweck müssen sie ein virtuelles *environment* entwerfen, das aus den sich ständig verändernden Relationen zu umgebenden Objekten besteht und es erlaubt, Aktionen und Reaktionen zu berechnen und durchzuführen.

Als Verfahren der Anpassung an unvorhersagbare *environments* sind adaptive, autonome Technologien heute so einflussreich, weil sie einen sicheren Umgang mit der Unsicherheit des *environments* versprechen. Die im Folgenden vorgeschlagene Perspektive auf die Entwicklung selbstfahrender Autos als adaptiver Technologien und insbesondere der neuartigen Kopplung von Sensorik und Filteralgorithmen im Kontext der Robotik und der KI-Forschung um 1990 legt offen, dass die Arbeit an Robotern, die sich in unvorhersagbaren *environments* sicher bewegen können, die Debatten der Kybernetik um die Gestaltbarkeit von Umgebungen fortsetzt und dabei den Ansatz Ross Ashbys aufnimmt, dessen Homöostat als Prototyp einer adaptiven Technologie gelten kann.

Die Annahme der Unsicherheit des *environments* ist entsprechend nicht als eine Absage an die Verfahren des *environmental designs*, des *environmental engineering*s und des *environmental management*s zu verstehen, auch wenn sich deren Verfahrensweisen ändern. Vielmehr geht es darum, dass die Annahme der Unvorhersagbarkeit des *environments* in der Erforschung seiner kybernetischen Gestaltbarkeit schon angelegt ist. Im Rückgriff auf Ashby wird deutlich, dass seine in *Design for a Brain* erarbeitete Definition der Autonomie eines Systems aus seiner Abhängigkeit vom *environment* nicht nur Adaption als Gestaltungsprinzip nahelegt, sondern Unsicherheit zur Voraussetzung der Adaptionsfähigkeit des Systems macht.⁸ Auch Hollings Begriff der Resilienz und der mit ihm einhergehende Imperativ der Adaption ersetzen Stabilität durch Dynamik, bleiben aber der kybernetischen Kom-

5 Vgl. Hayles: »RFID« sowie Rosol, Christoph (2007): *RFID. Vom Ursprung einer (all)gegenwärtigen Kulturtechnologie*. Berlin, Kadmos.

6 Vgl. Ceruzzi, Paul E. (2018): *GPS*. Cambridge, MIT Press.

7 Vgl. Sprenger, Florian: »The Network is not the Territory. On Capturing Mobile Media«. In: *New Media & Society* 10/2 (2018) sowie Sprenger, Florian: »Ort und Bewegung. Mobile Adressierung, Cellular Triangulation und die Relativität der Kontrolle«. In: *Jahrbuch für Technikphilosophie* 5 (2019), S. 47-75.

8 Vgl. Ashby (1954): *Design for a Brain*. S. 57f.

position des Systems verpflichtet – lediglich die Vorzeichen ändern sich. Wie sich zeigen wird, ersetzt auch die Robotik die Annahme eines stabilen, durch gezielte Eingriffe gestaltbaren Umgebungsverhältnisses durch Verfahren der Adaption, definiert dabei aber die Autonomie des Systems als Steigerung seiner Abhängigkeit von der Umgebung. Unsicherheit wird so in die ökologische Relation integriert. -

Mit den Transformationen autonomer und adaptiver Technologien, die im Fall von selbstfahrenden Autos mit der Einführung von Fahrassistenzsystemen schrittweise neue Grade der Autonomie erlangen, während die vollständige Fahrerlosigkeit derzeit lediglich in einigen Prototypen realisiert ist, ist eine ganze Reihe medientheoretischer Fragen verbunden. Diese betreffen die Autonomie der im Detail sehr unterschiedlichen Techniken, das Verhältnis ihrer Mobilität zu lokalen und fest verankerten Infrastrukturen der Distribution von Energie und Information sowie die sensorischen Kapazitäten, mit denen sie sich im Raum verorten und mit den Objekten in ihren Umgebungen interagieren. Autonome und adaptive Technologien können nicht mehr als losgelöst von ihren Umgebungen beschrieben werden, weil sie auf der Grundlage der Relationen zu den technischen oder nicht-technischen Objekten in ihren *environments* operieren. Auf unterschiedliche Weise werden dabei Umgebungsrelationen nutzbar gemacht, um technische Objekte im Raum, d.h. in Relation zu anderen Objekten sowie möglichen Einflussfaktoren in ihrer Umgebung zu orientieren und zu mobilisieren.

Im Kontext dessen, was Mark Hansen in Bezug auf das *ubiquitous computing* eine »originary ›environmental condition«⁹ genannt hat, ist es vor dem Hintergrund der bis hierhin erläuterten Geschichte nicht verwunderlich, dass zur Beschreibung dieser Technologien immer wieder die Ökologie mit ihren Modellen und Metaphern in Anschlag gebracht wird.¹⁰ Sie verfügt über Begriffe und Konzepte, mit denen Umgebungsverhältnisse und die komplexen Dynamiken ihrer Wechselwirkungen erfasst werden können, ohne bestimmten Faktoren eine Priorität zuzuschreiben. Doch bei der Auseinandersetzung mit diesen Technologien wird allzu häufig eine ökologische Relationalität vorausgesetzt und ihre Beschreibung als Ökologie als selbstverständlich postuliert. Um diese unhinterfragte Übertragung ökologischer Modelle und Metaphern sowie die Verwechslung von Beschriebenem und Beschreibungssprache zu vermeiden, soll es an dieser Stelle darum gehen, anhand des Beispiels (semi)autonomer Fahrzeuge und der Verfahren der Virtualisierung ihrer *environments* anzudeuten, auf welche Weise Umgebungsrelationen gegenwärtig technologisch nutzbar gemacht und wie *environments* technisch gefertigt werden. Wichtig ist es dabei, die Beschreibung dieser Technologien als

9 Hansen: »Ubiquitous Sensation«, S. 84.

10 Vgl. McCullough (2005): *Digital Ground*. S. 188f.; Fuller (2007): *Media Ecologies*; Hörl: »Die Ökologisierung des Denkens«.

Ökologien nicht gegeben zu nehmen, sondern die Frage zu stellen, wie ihre *environments* hervorgebracht werden, welche Umgebungsverhältnisse und Kausalitäten sie bilden und welche Formen biopolitischer Macht über das Umgebene mit ihnen verbunden sind.

Wenn ein *environment* all das umfasst, was in einer Wechselwirkung mit dem jeweils Umgebenen steht und seine Reichweite von spezifischen ökologischen Relationen begrenzt wird, wenn also nicht jeder Raum ein *environment* ist, sondern es Bedingungen gibt, unter denen er dazu wird, dann resultieren adaptive Umgebungstechnologien in einer massiven Ausweitung technischer *environments*, die dennoch nicht allumfassend und ubiquitär sind. (Semi-)Autonome Autos bringen, wie deutlich werden wird, durch eine komplexe Verschränkung von Sensorik und Filteralgorithmen ihr *environment* hervor, indem sie sich in ihm bewegen. Entsprechend ist es wichtig, den Unterschied zwischen *environments* und topologischen Räumen aufrechtzuerhalten, weil nur so die Bedingtheit und Artifizialität von *environments* sichtbar wird. Diese Verfahren der Relationalisierung dienen dazu, Umgebungsverhältnisse in quantifizierbare und verwertbare Relationen zu überführen, indem sie in Wahrscheinlichkeiten verwandelt werden. Mit der Operationalisierung probabilistischer Verfahren zur Virtualisierung von *environments* wird die Unsicherheit des *environments* in Wahrscheinlichkeiten verwandelt.

Die Räume, in denen technische Objekte durch solche Verfahren der Relationalisierung lokalisiert werden bzw. sich selbst lokalisieren, sind relationale und kein absoluten Räume. Nur deswegen können sie zu *environments* werden. So wie der Navigator eines Schiffs dessen Position in Abhängigkeit von Himmelskörpern berechnet und damit räumliche Koordinaten durch Relationen ermittelt, so sind auch Umgebungstechnologien auf Verfahren der Bestimmung ihrer Relationen angewiesen, weil sie über keine Karte und keinen externen Beobachterstandpunkt verfügen. Im Gegensatz zum Navigator können sie sich jedoch nicht auf absolute Bezugspunkte im Außerhalb verlassen, sondern sind sowohl mit der Unsicherheit über ihre eigene Position im *environment* als auch mit der Unvorhersagbarkeit von dessen Dynamik konfrontiert. Die entsprechenden Verfahren der Relationalisierung operieren auf unterschiedlichen Skalierungsebenen von der geographischen Lokalisierung auf der Erdoberfläche bis hin zur Interaktion mit anderen VerkehrsteilnehmerInnen auf einer Kreuzung. An dieser Stelle ist nur ein kleiner Ausblick auf eine Auswahl aus der Vielfalt solcher Verfahren möglich. Eine Auseinandersetzung mit ihnen bildet jedoch den Ausgangspunkt einer weiterführenden Kritik dieser Technologien, die – entsprechend der in den bisherigen Ausführungen wiederholten Vorsicht – *environments* nicht als gegebene Räume versteht und Ökologien nicht voraussetzt, sondern fragt, wie *environments* als Relationsräume verfertigt werden und warum ihre Beschreibung als Ökologien plausibel erscheint.

7.1 Autonome Autos und ihre Umgebungen

Um sich in den komplexen *environments* des Straßenverkehrs zu bewegen, muss ein autonomes Fahrzeug kontinuierlich die Zustände – Form, Position und Bewegung – der umgebenden Objekte registrieren und sich selbst in Relation zu ihnen lokalisieren.¹¹ Es hat keinen Zugriff auf einen Blick von außen, sondern muss seinen eigenen Ort und mögliche Reaktionen auf seine Umgebung immer wieder neu berechnen. Da sowohl das Fahrzeug als auch andere Verkehrsteilnehmer mobil sind, verändern sich die Umgebungsrelationen ständig. Weil das Fahrzeug nicht wissen kann, an welcher Position es sich aktuell befindet, sind ihm weder sein Ort noch sein Verhältnis zu anderen Objekten gegeben. Sein *environment* muss vielmehr durch technische Verfahren der Sensorik, der algorithmischen Filterung und der Datenauswertung sowie eine feingliedrige Motorik hervorgebracht werden, um die Relationen des Fahrzeugs zu seiner Umgebung zu bestimmen.¹² Selbst wenn das Fahrzeug über Kartenmaterial und GPS verfügt, sind diese Verfahren für Fahrmanöver zu ungenau und vor allem nicht dynamisch genug, um ein operationsfähiges Modell der Fahrzeugumgebung zu erstellen. Die technische Herausforderung besteht, anders gesagt, in einem sicheren Umgang einerseits mit der Unsicherheit des autonomen Systems über sein *environment* sowie andererseits mit der Unvorhersagbarkeit des Verhaltens anderer VerkehrsteilnehmerInnen. Sicherheit im Umgang mit dieser doppelten Unsicherheit (des Systems über seinen eigenen Zustand wie der Umgebung) ist eine wichtige Komponente der Autonomie des Fahrzeugs. In einer ökologischen Relation im Sinne Morins steigt mit seiner Unabhängigkeit von der Umgebung, ergo seiner Autonomie, die Abhängigkeit von

11 Autonom meint an dieser Stelle die Ausstattung eines Autos mit Fahrassistenzsystemen, die Aufgaben des Fahrers übernehmen (von adaptiven Abstandshaltern über Notbremsassistenten bis hin zu Autopiloten). Die Verfeinerung und Durchsetzung dieser Systeme geschieht schrittweise, während vollständig fahrerlose Autos derzeit nur in Prototypen existieren. Autonomie bedeutet also, Christoph Hubig folgend, die Erweiterung der dem semi-autonomen Fahrzeug eigenen Kapazitäten der Wahl der Mittel für ein gegebenes Ziel (operative Autonomie) bis hin zur Wahl unterschiedlicher Zwecke für ein Ziel (strategische Autonomie), jedoch nicht die Anerkennung und Rechtfertigung von Zielen (ethische Autonomie). Vgl. Hubig, Christoph (2015): *Die Kunst des Möglichen III. Grundlinien einer dialektischen Philosophie der Technik: Macht der Technik*. Bielefeld, transcript, S. 131f. Der Einfachheit halber wird an dieser Stelle der Terminus *autonome Autos* verwendet, ohne in semi-autonome, autonome und selbstfahrende Autos zu unterscheiden.

12 Ähnlich schreibt Jennifer Gabrys: »The becoming environmental of computation then signals that environments are not fixed backdrops for the implementation of sensor devices, but rather are involved in processes of becoming along with these technologies. Environment is not the ground or fundamental condition against which sensor technologies form, but rather develops with and through sensor technologies as they take hold and concreate in these contexts.« Gabrys (2016): *Program Earth*. S. 9.

der Umgebung, weil immer mehr Information über deren Gegebenheiten benötigt werden und auf immer mehr Faktoren reagiert werden muss. Autonome Autos sind Umgebungstechnologien, weil sie durch die Verschränkung von Sensorik und Filteralgorithmen jene *environments* als virtuelle Modelle technisch hervorbringen, in denen sie sich bewegen und mit denen sie interagieren.

Das aufgeworfene Problem wird in der Robotik und der Forschung zu Künstlicher Intelligenz um 1990 unter dem Namen *Simultaneous Location and Mapping* (SLAM) verhandelt: Die Ausgangsbedingung eines Roboters besteht im Nicht-Wissen über sein *environment*.¹³ Er kann dieses nur kartographieren, indem er sich bewegt und mit den verfügbaren Sensoren Daten sammelt, die jedoch ebenso fehleranfällig sind wie die odometrischen Daten über den eigenen Zustand.¹⁴ Alle Daten, die der Roboter über sein *environment* registriert, sind relativ zu seiner eigenen Position und damit abhängig von seiner Lokalisierung, deren Berechnung wiederum nötig ist, um sich auf der zu erstellenden Karte zu verorten. Wenn sich der Roboter bewegt und die Umgebung sowohl am Ausgangspunkt als auch während der Bewegung misst, verfügt er abhängig von seinen Positionen über unterschiedliche Datensätze über die Umgebung, die mittels probabilistischer Filterverfahren verglichen werden können. Daraus ergeben sich Wahrscheinlichkeitswerte sowohl für die aktuelle Position des Roboters als auch für die Form, Position und Bewegung umgebender Objekte, aus denen eine stets fragmentarische Karte bzw. ein Modell berechnet wird. Kurz gesagt: Um sich zu lokalisieren, braucht der Roboter eine Karte, und um eine Karte zu erstellen, muss er sich lokalisieren.¹⁵ Beide Aufgaben können nur simultan gelöst werden: *Simultaneous Location and Mapping*.

Um 1990 entstehen in der Robotik unterschiedliche algorithmische Verfahren zur Lösung dieses Problems des Umgangs mit Unsicherheit (z.B. Kalman Filter,

13 Erstmals formuliert werden diese Prinzipien Ende der 1980er Jahre: Durrant-Whyte, Hugh F.: »Uncertain Geometry in Robotics«. In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* 4/1 (1988), S. 23-31; Smith, Randall/Cheeseman, Peter: »On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty«. In: *The International Journal of Robotics Research* 5/4 (1986), S. 56-68; Smith, Randall/Self, Matthew/Cheeseman, Peter: »Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics«. In: *Machine Intelligence and Pattern Recognition* 5 (1988), S. 435-461. Vgl. auch Dissanayake, M.W.M.C./Newman, P./Clark, S./Durrant-Whyte, H.F./Csorba, M.: »A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem«. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17/3 (2001), S. 229-241.

14 Odometrie bezeichnet Methoden, mit denen die Position, Geschwindigkeit und Lage eines Roboters durch die Auswertung seines Antriebssystems geschätzt werden. Da diese Daten ungenau und fehlerbehaftet sind, können sie nur im Verbund mit anderen Daten verwendet werden.

15 Vgl. Burgard, Wolfram/Hebert, Martial/Bennewitz, Maren: »World Modeling«. In: Siciliano, Bruno/Khatib, Oussama (Hg., 2016): *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Springer, S. 1134-1151. Hier: S. 1134.

FastSLAM, Particle Filter Localization). Sie zielen darauf, von den verfügbaren Sensoren gesammelte Daten zu einem *world* bzw. *scene model* – in der Forschung bezeichnenderweise auch *belief* genannt¹⁶ – zusammenzufügen. Die Herausforderung besteht darin, dass sich die von den Sensoren erfasste Gestalt mit jeder Bewegung des Roboters verändert. Entsprechend ist dieses Modell stets an den Standort der sensorischen Beobachtung gebunden und hat eine operative Funktion: »The world modeling system serves as a virtual demonstrative model of the environment for the whole autonomous system.«¹⁷ Dieses Modell dient als eine Karte, die keinen Anspruch auf eine Repräsentation der Außenwelt stellt, sondern nur das zeigt, was in einer relevanten Relation zum Roboter steht und von dessen Sensoren registriert wird. Aufgrund des SLAM-Problems besteht dieses Modell, wie gezeigt werden soll, aus nichts anderem als Wahrscheinlichkeitswerten über die Attribute des *environments*. Diese Verfahren markieren eine Konzeption des *environments* als technisch durchdrungener Unsicherheit, die durch die Relationen eines autonomen Systems zu den Objekten seiner Umgebung in eine operationsfähige Probabilistik verwandelt werden kann. Damit sind eine erneute Transformation des Verhältnisses von *environment* und Technik sowie entsprechende Epistemologien des Umgebens verbunden, die den Abschluss dieses Buches bilden.

Funktionsfähig werden mobile autonome Systeme erst um 2005, als die Rechenkapazitäten ausreichen, um die Daten verbesserter Sensoren, insbesondere des neuen Lidar-Verfahrens, das Laser-Punktwolken zur exakten Erfassung der Konturen und Entfernungen von Objekten verwendet, in *real-time* auszuwerten und durch Machine Learning zu optimieren.¹⁸ Als Scheidepunkt für diese Technologi-

16 In der Forschung zu den probabilistischen Grundlagen der Robotik wird das Weltmodell *belief* genannt, weil das System seinen eigenen Status nie genau bestimmen kann (vgl. Thrun, Sebastian/Burgard, Wolfram/Fox, Dieter (2006): *Probabilistic Robotics*. Cambridge, MIT Press. S. 3). Die Begriffe *world model* und *scene model* sind nicht fest definiert und werden unterschiedlich verwendet. Verallgemeinert kann man sagen, dass *world modeling* auch extern zugespielte statische Daten z.B. über Straßenkarten oder die Verkehrslage sowie den Datenaustausch mit anderen Fahrzeugen umfasst, während *scene modeling* die Erstellung jener verkörperten Situation meint, in der das Fahrzeug sich befindet.

17 Beyerer, Jürgen/Gheța, Ioana/Heizmann, Michael/Belkin, Andrey: »World Modeling for Autonomous Systems«. In: Dillmann, Rüdiger/Beyerer, Jürgen/Hanebeck, Uwe et al. (Hg., 2010): *KI 2010. Advances in Artificial Intelligence*. Berlin, Springer, S. 176–183. Hier: S. 138.

18 Lidar steht für *Light Detection and Ranging* und bezeichnet eine Methode, durch eine Kopplung einer großen Menge von Laserstrahlen mittels Reflexionen an Objekten optische Messungen von Abständen und Geschwindigkeiten durchzuführen. Durch die Parallelisierung von Laserstrahlen entstehen sogenannte Punktwolken, die den dreidimensionalen Umriss eines Objekts abhängig vom Ausgangspunkt des Lidar-Moduls anzeigen. Im Gegensatz zu optischen Kameras kann Lidar also nicht nur die Form von Objekten erfassen, sondern liefert exakte Daten über deren Entfernung zum Fahrzeug und macht dadurch ihre Geschwindigkeit berechenbar. Da Lidar-Systeme sehr teuer sind, werden in vielen Fahrassistenzsystemen derzeit einfachere Laser- und Radar-Module verwendet.

en gelten die von der DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) und damit vom US-Verteidigungsministerium ausgeschriebenen drei Grand Challenges von 2004, 2005 und 2007.¹⁹ Die Herausforderung der ersten beiden mit einem Preisgeld von zwei Millionen Dollar versehenen Wettbewerbe besteht darin, ein autonomes Auto ohne Fahrenden oder Fernsteuerung eine vorgegebene Strecke durch die kalifornische Mojave-Wüste fahren zu lassen. In der ersten DARPA Grand Challenge schafft 2004 das erfolgreichste Fahrzeug von der Carnegie-Mellon University nur zwölf von 227 Kilometern. Spätestens seitdem nur ein Jahr später das vom Stanford Racing Team um den Ingenieur und KI-Forscher Sebastian Thrun in Kooperation mit Volkswagen konstruierte selbstfahrende Auto Stanley die zweite Challenge mit 107 registrierten und 17 antretenden Teilnehmern gewinnt, gilt die technische Konvergenz von neuen Sensortechnologien mit probabilistischen Algorithmen und Machine Learning als Standardverfahren. Heute dominiert dieses Vorgehen in ständig weiterentwickelten Ausführungen die Entwicklung von Fahrerassistenten.

Der Prototyp Stanley, dessen Weiterentwicklung Junior zwei Jahre später bei der DARPA Urban Challenge den zweiten Platz hinter dem verbesserten Fahrzeug der Carnegie-Mellon University belegt, verfügt über die Sensorik eines auf dem Dach montierten rotierenden Lidar-Moduls, optischer Kameras, eines Radars und eines GPS-Moduls. Im ersten Schritt werden die Daten dieser unterschiedlichen Sensoren durch die algorithmischen Filter des SLAM-Verfahrens zu einem *world model* synthetisiert und im zweiten Schritt die Manövrierung mittels der neuen Möglichkeiten des Machine Learning durch die Beobachtung erfolgreicher (menschlicher) Fahrmanöver optimiert. Dieses doppelte Vorgehen ersetzt die Notwendigkeit einer apriori gegebenen topologischen Karte und ermöglicht die Manövrierung und Navigation auch in unwegigem Terrain bzw. in Anwesenheit anderer VerkehrsteilnehmerInnen, deren Verhalten sich nicht vorhersagen lässt.

Algorithmische Verfahren der Lokalisierung und räumliche Tracking-Systeme, wie sie seitdem in selbstfahrenden Autos oder Drohnen im sensorischen Verbund von optischen, Infrarot-, Ultraschall- und Wärmebildkameras, Sonar, Radar, Laser und Lidar verwendet werden, repräsentieren nicht einfach den erfassten Raum, sondern registrieren durch unterschiedliche Wellenspektren die Umrisse und Entfernungen von Objekten. Da jedoch sowohl das Fahrzeug als auch die Objekte potentiell mobil sind und sich Entfernungen ständig ändern, können zumindest mit Sonar, Radar, Laser und Lidar nur Wahrscheinlichkeiten ihrer Position angegeben werden.

19 Vgl. Iagnemma, Karl/Buehler, Martin: »Editorial for Journal of Field Robotics. Special Issue on the DARPA Grand Challenge«. In: *Journal of Field Robotics* 23/8 (2006), S. 461-462. Hintergrund der Darpa Challenges war die Vorgabe des Verteidigungsministeriums, dass bis 2015 ein Drittel der militärischen Bodenfahrzeuge fahrerlos sein sollte.

Die dazu angewandten Verfahren verbinden sensorische Erfassung und Filteralgorithmen. Auf der Grundlage von Daten über Umgebungsrelationen, die sowohl aus den Sensoren als auch aus den odometrischen Systemen der Selbstdiagnose stammen, berechnet die Prozessoreinheit des Autos durch mathematische Filter die Wahrscheinlichkeit möglicher Positionen und Bewegungen der getrackten Objekte im Raum sowie die wahrscheinliche Position des Fahrzeugs in Relation zu diesen Objekten.²⁰ Die algorithmischen Filter basieren auf dem Vergleich von zu unterschiedlichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Positionen gesammelten Sensordaten, deren Überlagerung Wahrscheinlichkeiten ergibt. Die Analyse der Sensordaten geschieht grob gesprochen dadurch, dass mittels sogenannter Bayesischer Filter aus der gemessenen Entfernung und Kontur eines umgebenden Objekts zu unterschiedlichen Zeitpunkten und an unterschiedlichen Positionen in Relation zum Fahrzeug wahrscheinliche Attribute des *environments* sowie Dynamiken der Bewegung berechnet werden. Ein Bayesischer Filter vergleicht das erstellte Modell der Umgebung zum Zeitpunkt t_{-1} mit den von einer anderen Position aus gesammelten Sensordaten zum Zeitpunkt t und bestimmt aus der Überlagerung beider Messungen die Wahrscheinlichkeit der Lokalisierung des Fahrzeugs sowie von Objekten in der Umgebung. Da sich die Gegenwart t stets als anders herausstellen kann als die aus der Vergangenheit t_{-1} berechnete Zukunft, entspricht diese Probabilistik der Virtualität einer möglichen, aber wahrscheinlichen Welt, die in ein operationalisierbares Modell überführt wird, das wiederum zeitkritisches Agieren ermöglicht.

Die Identifizierung spezifischer Objekte – etwa von Kindern oder Verkehrschildern am Straßenrand – und die Berechnung von Fahrmanövern – Bremsen, Ausweichen, Abbiegen – sind ein sekundärer Schritt, für den zumeist auf optische Kameras zurückgegriffen wird. Davor steht die Synthese unterschiedlicher Sensorsysteme zu einem Modell des *environments*, das jedoch immer den Status von Wahrscheinlichkeiten hat.²¹ Dazu müssen die Daten unterschiedlicher Sensoren durch sogenannte »generic multisensor data fusion algorithms«²² synthetisiert werden. Mit jeder Modifikation oder Neueinführung von Sensoren müssen diese Algorithmen angepasst und die unterschiedlichen Kapazitäten der Sensoren zur Erfassung des *environments* abgeglichen werden. Beispielsweise hat Laser nur eine Reichweite

20 Vgl. Thrun, Sebastian/Burgard, Wolfram/Fox, Dieter: »A Probabilistic Approach to Concurrent Mapping and Localization for Mobile Robots«. In: *Machine Learning* 31/1/3 (1998), S. 29–53 sowie Matthaei, Richard/Maurer, Markus: »Autonomous Driving. A Top-Down-Approach«. In: *Automatisierungstechnik* 63/3 (2015), S. 155–167.

21 Vgl. Belkin, Andrey (2017): *World Modeling for Intelligent Autonomous Systems*. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing.

22 Elfring, Jos/Appeldoorn, Rein/van den Dries, Sjoerd/Kwakkernaat, Maurice: »Effective World Modeling: Multisensor Data Fusion Methodology for Automated Driving«. In: *Sensors* 16/10 (2016), S. 1–28. Hier: S. 1.

von dreißig Metern, erfasst die Konturen naher Gegenstände aber aufgrund der Entfernungsmessung sehr genau, während optische Kameras in Nahsituationen unzuverlässig sind, aber eine hohe Reichweite bieten. Jede Sensortechnologie erfasst in diesem Sinn ein eigenes *environment*, das im *scene modeling* durch die Fusion der Daten mit anderen *environments* verknüpft wird. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen je nach Ausstattung des Fahrzeugs von der Berechnung des Abstands zu anderen VerkehrsteilnehmerInnen bis hin zum 360 Grad-Modeling des Autos.

Solche Modelle sind nicht als Repräsentation der Umgebung zu verstehen, sondern als temporäre Konstellation sensorischer Daten und ihrer Probabilistik. Die komplexe Sensorik dieser Technologien ist mithin nicht auf die Kartographierung einer Ontologie ausgerichtet, in der alle Objekte wie auf einer Landkarte anhand gegebener Koordinaten registriert werden, sondern auf die sich ständig wandelnden Relationen eines virtuellen *environments*, das durch die Verhältnisse von Objekten zueinander und zum umgebenen Objekt gebildet wird. Objekte sind für Sensoren keine physischen Dinge, sondern Bewegungen und Umrisse, also Relationen. Für das mobile autonome System, das sich anhand solcher Verfahren im Raum orientiert und schließlich bewegt, bedeutet dies, sich als Umgebenes durch Relationen zum Umgebenden zu verorten. Es hat keinen Zugang zur Außenwelt, sondern operiert ausschließlich mit den ihm zur Verfügung stehenden digitalen Sensordaten.

Das anhand dieser Daten entworfene Modell des *environments* ist die Grundlage für alle Entscheidungen, die ein autonomes Auto treffen muss: bremsen oder nicht bremsen, rechts oder links abbiegen, den LKW überholen oder nicht. Diese Akte können nicht erklärt werden, wenn man sie allein als Ausführung determinierter Algorithmen versteht, die bei gleichem Input immer gleichen Output liefern und festlegen, dass bei einem bestimmten Ereignis eine definierte Reaktion ausgelöst werden muss. Ein autonomes System muss in der Lage sein, auf alle Ereignisse in der Umgebung zu reagieren. Dafür müssen ihm stets mehrere Optionen offenstehen. Andernfalls wäre es nicht autonom, sondern determiniert und könnte sich nicht adaptiv an unsichere Umgebungen anpassen. Dass es stets über mehrere Optionen verfügt, ist die Bedingung seiner Autonomie, die durch adaptive Umgebungstechnologien ermöglicht wird.

In diesem Sinn geht die Ausweitung und ständige Verbesserung autonomer technischer Systeme nicht nur im Straßen- und Luftverkehr, sondern auch im Internet der Dinge oder in logistischen Zusammenhängen mit einer Rekonzeptualisierung der ökologischen Un/Abhängigkeitsrelationen zwischen Umgebendem und Umgebenem einher. Der heutige Stand dieser Technologien, ihre Kapazitäten und Adaptionspotentiale, hängen mit der langjährigen Erforschung adaptiver Vorgänge in einem mit seinem *environment* rückgekoppelten System zusammen, die in

den 1990er Jahren unter dem Namen *artificial life* firmieren.²³ Vor allem die in diesem Kontext einflussreichen Arbeiten Francisco Varelas greifen einen Strang der Kybernetik aus den 1940er Jahren auf, als im Zusammenhang der Forschung zu den Kapazitäten des Nervensystems versucht wird, dessen Lernvorgänge nicht nur durch die symbolische Verarbeitung von In- und Outputs, sondern durch das adaptive Verhalten des Organismus gegenüber seinem *environment* zu definieren. Ausgehend von der Annahme, dass adaptives Verhalten – in komplexitätsreduzierter Form – in technischen Modellen repräsentierbar sei, geht William Ross Ashby zu dieser Zeit davon aus, dass das Nervensystem in einem analogen System simulierbar ist. 1948 entwickelt er mit dem Homöostaten die im dritten Kapitel genauer untersuchte ›verkörperte Theorie‹ des Nervensystems als selbstregulierender Maschine, die Organismus und *environment* verschränkt. Mit seiner Maschine versucht er, ein sich selbst regulierendes System umzusetzen, das weder als Werkzeug noch als Rechenmaschine verstanden werden kann. Es operiert auf der Grundlage ökologischer Relationen der Un/Abhängigkeit des Umgebenden vom Umgebenden und führt vor, dass die Autonomie eines Systems auf einem adaptiven Verhältnis der Abhängigkeit vom *environment* basiert. Eben dieses adaptive Umgebungsverhältnis wird von Varela um 1990 zur Beschreibung autonomer technischer Systeme in Anschlag gebracht und inspiriert auch die Robotik.

Ashbys Homöostat entsteht, wie im dritten Kapitel gezeigt wurde, aus der Auseinandersetzung mit der Adaptionsfähigkeit des Nervensystems an fluktuierende Zustände seines *environments*. Es handelt sich um eine Umgebungsmaschine, die sich zwar nicht autonom im Raum bewegt, aber ihre eigenen Zustände durch die reziproke Verschränkung mit dem *environment* reguliert.²⁴ Der Homöostat besteht aus vier elektrisch verbundenen Modulen, die so verschaltet sind, dass der Eingangsstrom jedes Moduls von den drei Ausgangsströmen der anderen Module beeinflusst wird. Jede Veränderung eines Moduls wird als Output an die drei anderen Module verteilt und sorgt für Schwankungen in den anderen Modulen und dem jeweiligen Modul selbst. Wird eines der Module über einen Grenzwert belastet, wird der elektrische Widerstand des betroffenen Moduls im Zufallsmodus gewechselt und ein neuer Grenzwert definiert. Als adaptives System stabilisiert (oder destabilisiert) dieser Prototyp durch die Relationen zwischen den Modulen seinen eigenen Zustand. Jedes Modul ist in der Lage, sich an beständig ändernde Variablen seiner

23 Der Begriff *artificial life* wird Mitte der 1980er Jahre von Christopher Langton geprägt, der sich vor allem mit der computergestützten Simulation zellulärer Automaten beschäftigt: Langton, Christopher G.: »Studying Artificial Life with Cellular Automata«. In: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 22/1-3 (1986), S. 120-149.

24 Die beiden von Grey Walter entwickelten schildkrötenartigen Roboter Elmer und Elsie bewegen sich zwar im Raum, behandeln das *environment* aber nur als Black Box, die Reaktionen auslöst (vgl. Walter: »An Imitation of Life« sowie Parikka, Jussi (2010): *Insect Media. An Archaeology of Animals and Technology*. Minneapolis, University of Minnesota Press. S. 134f.).

Umgebung, an Fluktuationen und abrupte Wechsel anzupassen, ohne seine innere Organisation zu verlieren. Um mit der Komplexität der Fluktuationen seiner Umgebung umzugehen und sich in ihr verhalten zu können, muss der Homöostat seinen eigenen Zustand nicht nur in das System einspeisen und sich mit sich selbst rückkoppeln, sondern zugleich die Effekte seines rückgekoppelten Zustands auf seine Umgebung in seinen eigenen Zustand einfließen lassen. Er muss eine Form von Rekursivität aufweisen, die als Zirkularität zwischen dem System und seinem *environment* vermittelt – ganz so, wie der Kreis, mit dem Ashby in seinem Labortagebuch das Umgebungsverhältnis darstellt. Das System des Homöostaten wird erst als Dyade autonom, weil es Abhängigkeit – die Angewiesenheit jedes Moduls auf den Stromfluss der anderen Module – und Unabhängigkeit – den je eigenen Grenzwert – durch eine ökologische Relation verschränkt. So wird die Umgebung des Systems in dessen inneren Zustand integriert.

Ashbys Überlegungen geraten aufgrund der Erfolge symbolischer Maschinen, die Daten in digitaler Form verarbeiten, zunächst in Vergessenheit. Um 1990 münden sie jedoch in eine Reformulierung dieses Forschungsansatzes, in dessen Zusammenhang Ashbys Arbeiten zum Ausgangspunkt einer mit einigen Unterbrechungen bis in die Gegenwart geführten Debatte über die Autonomie adaptiver Maschinen werden.²⁵ Im Kontext dessen, was zu dieser Zeit *artificial life* genannt wird und die KI-Forschung und die Robotik gleichermaßen umtreibt, geht es um die Konstruktion autonomer, ihre Umgebungen erfassender Maschinen. Diese Ansätze stehen noch im Hintergrund der gegenwärtigen Entwicklungen autonomer Technologien und haben deren theoretische Grundlagen beeinflusst. Das in diesem Kontext etablierte Nachdenken über Umgebungsrelationen und die Konstruktion von Umgebungstechnologien greifen ineinander und münden in der historischen Konstellation der Gegenwart, in der nicht nur Umgebungen technisch gestaltet werden, sondern autonome Technologien wie selbstfahrende Autos oder Drohnen *environments* hervorbringen, die als virtuelle Modelle der Wahrscheinlichkeit operational sind.

Zumindest die bereits angedeutete kybernetische Ausrichtung dieser neuen Forschungsperspektive steht in direkter Kontinuität zu den Arbeiten der Kybernetik. Der chilenische Biologe und Philosoph Francisco Varela, der um 1990 ein neues, umgebungsgebundenes Verständnis von Autonomie formuliert, ist Anfang der 1970er Jahre am von Heinz von Foerster geleiteten Biological Computer Laboratory (BCL) der University of Urbana-Champaign in Illinois zu Besuch, wo Ashby von 1960 bis 1970 dauerhafter Visiting Research Professor ist.²⁶ Gemeinsam mit Humberto Maturana, zu dieser Zeit ebenfalls Gast am BCL, entwickelt Varela im

25 Vgl. zur aktuellen Auseinandersetzung Franchi, Stefano: »Homeostats for the 21st Century? Simulating Ashby Simulating the Brain«. In: *Constructivist Foundations* 9 (2013), S. 93-124.

26 Vgl. zum BCL ausführlich Müggenburg (2018): *Lebhafte Artefakte*.

Kontext der dortigen Ansätze die Theorie der Autopoiesis, d.h. der Hervorbringung der Komponenten eines biologischen Systems durch die Operationen dieses Systems. In ihrem 1971 auf Spanisch erschienenen und 1980 übersetzten Text *Biology of Cognition* überführen Maturana und Varela den Gedanken der operationalen Schließung eines biologischen Systems in die Idee eines seine eigenen Bestandteile erzeugenden Systems. Die beiden Biologen stützen sich auf das Prinzip der undifferenzierten Codierung, welches besagt, dass Nervenimpulse nur die Quantitäten, nicht aber die Qualitäten ihrer Ursachen codieren. Daraus folgern sie, dass das Nervensystem ein funktional geschlossenes und energetisch offenes System darstellt. Entgegen der gängigen Annahme, dass Schließung Stillstand bedeute, erklären sie, wie die operationale Schließung des Systems seine Kontinuität ermöglicht und führen zur Beschreibung biologischer Systeme den Begriff der Autopoiesis ein: »[...] An autopoietic machine continuously generates and specifies its own organisation through its operations as a system of production of its own components, and does this in an endless turnover of components under the conditions of continuous perturbations and compensations of perturbation.«²⁷ Autopoietische Systeme haben in diesem Sinn keinen In- oder Output, sondern werden von Ereignissen in ihren *environments* strukturell perturbiert. Auf welche Art Veränderungen des *environments* indirekt aufgenommen werden, ist von der Struktur des Systems determiniert. Es besteht zwar eine strukturelle Kopplung mit dem *environment*, das System hat aufgrund seiner operativen Schließung aber keinen Zugang zu dem, was außerhalb von ihm geschieht.

Mit diesem Ansatz formulieren Maturana und Varela die Grundlagen der Kybernetik zweiter Ordnung, in welcher der Begriff der Adaption seine Bedeutung verändert und Ashbys Ansatz auf neue Weise virulent wird. Organismen adaptieren sich demnach nicht einfach an gegebene *environments* und können nicht auf die Außenwelt zugreifen, sondern bringen ihre Umgebung durch ihre geschlossene Selbstorganisation und Selbstreferentialität hervor.²⁸ In Fortsetzung dieses Ansatzes arbeitet Varela Mitte der 1980er Jahre in Paris an der Epistemologie des Nervensystems und seiner Autonomie. Vor dem Hintergrund dieser Forschungsarbeiten veranstaltet er 1991 gemeinsam mit dem Spieltheoretiker und Mathematiker Paul Bourguin die erste europäische Konferenz über *artificial life* mit dem Titel

27 Maturana, Humberto R./Varela, Francisco]. (1972/1980): *Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living*. Dordrecht, Reidel. S. 79.

28 Im Anschluss an Maturana und Varela sowie die Kybernetik zweiter Ordnung hat Mark Hansen die technische Durchdringung von *environments* beschrieben und gefordert, die Schließung bzw. Öffnung von *system-environment-hybrids* neu zu durchdenken, weil die technische Dimension des *environments* durch digitale Medien für die Beobachtung des Systems bislang vernachlässigt worden sei (vgl. Hansen: »System-Environment Hybrids«).

Toward a Practice of Autonomous Systems.²⁹ Die Beiträge der Konferenz richten sich auf ein neues Programm der Erforschung autonomer Systeme und der Simulation adaptiven Verhaltens, das die Herausgeber in ihrer Einleitung zum entsprechenden Sammelband als explizite Fortsetzung der Arbeiten Grey Walters und Ross Ashbys vorstellen.³⁰ Sie betonen, dass die symbolistischen und kognitivistischen Ansätze, welche die Forschung zu künstlicher Intelligenz zu dieser Zeit dominieren, die von der frühen Kybernetik erforschte Bedingtheit der Autonomie von Systemen gegenüber ihren environments nicht erklären können. Die konnektivistischen Modelle und frühen Versuche neuronaler Netzwerke hingegen, als deren Vorboten Varela und Bourguine Walters und Ashbys Arbeiten sehen, stünden für ein anderes Verständnis von *artificial life* und damit von autonomen Systemen: »Metaphorically, this current of thought would see in a modest insect, rather than in the symbolic abilities of an expert, the best prototype for intelligence.«³¹ Während der symbolistische Ansatz darauf ziele, Intelligenz als Symbolverarbeitung zu erfassen und damit das Verhältnis von Input und Output in den Mittelpunkt stelle, beschreiben Bourguine und Varela autonome Systeme mit dem Vokabular der kybernetischen Theorie der Autopoiesis und der daraus abgeleiteten Konzeption von Autonomie.

29 John Johnston hat die Bedeutung dieser Tagung für einen Perspektivwechsel innerhalb der KI-Forschung in den 1990er Jahren betont, der die Grundlage aktueller Arbeiten zu neuronalen Netzen bilde: Johnston (2008): *The Allure of Machinic Life*. S. 189f. Katherine Hayles beschreibt Varelas Forschung zu *artificial life* als dritte Phase der Kybernetik: Hayles (1999): *How We Became Posthuman*. S. 222f.

30 Zu dieser Veränderung in der Robotik und ihren medientheoretischen Implikationen vgl. Kasapowicz, Dawid: »New Labor, Old Questions. Practices of Collaboration with Robots«. In: Bergermann, Ulrike/Dommann, Monika/Schüttpelz, Erhard/Stolow, Jeremy/Taha, Nadine (Hg., 2019): *Connect and Divide. The Practice Turn in Media Studies*. Berlin, Diaphanes. Im Erscheinen.

31 Bourguine, Paul/Varela, Francisco J.: »Towards a Practice of Autonomous Systems«. In: ders./ders. (Hg., 1992): *Towards a Practice of Autonomous Systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. Cambridge, MIT Press, S. XI-XVIII. Hier: S. XIII. Zur Geschichte solcher »lebendiger Maschinen« in der Kybernetik vgl. ausführlich Müggenburg (2018): *Lebhafte Artefakte*. Parallel zu den Debatten um *artificial life*, d.h. die Umsetzung des Lebens sowohl durch natürliche als auch durch künstliche Systeme, werden in der KI-Forschung und der Robotik die zentralen Konzepte der *situatedness* und des *embodiment* eingeführt (vgl. Brooks, Rodney: »New Approaches to Robotics«. In: *Science* 253/5025 (1991), S. 1227-1232 sowie Ziemke, Tom: »The Construction of »Reality« in the Robot«. In: *Foundations of Science* 6/1/3 (2001), S. 163-233). Der in der Robotik dieser Zeit verfolgte Grundgedanke lautet, dass das Verhalten eines Roboters in seinem environment nicht durch Versuche der Repräsentation der umgebenden Objekte verstanden werden kann, sondern durch die verkörperte Interaktion mit ihnen. Zentral ist dabei der Gedanke der Situiertheit, der impliziert, dass das Design eines Roboters dessen Adaption an das gegebene environment umsetzen muss, anstatt diese Anpassung durch Datenverarbeitung herzustellen. Vgl. dazu auch Weber, Jutta/Suchman, Lucy: »Human–Machine Autonomies«. In: Bhutta, Nehal/Beck, Susanne/Geiß, Robin et al. (Hg.; 2016): *Autonomous Weapons Systems. Law, Ethics, Policy*. Cambridge, Cambridge University Press, S. 75-102.

Das *environment* fungiert dabei Varela zufolge »as a source of independent events in the sense that these are not determined by the organization of the system«³². Wenn ein autonomes System im erläuterten Sinn geschlossen ist, dann kann das *environment* nur ein unabhängiges, aber die Organisation des Systems perturbierendes Außen darstellen. Für einen externen Beobachter hingegen erscheint die strukturelle Kopplung des unabhängigen *environments* und des Systems als gegenseitige prozessuale Hervorbringung: »If we can consider the system's environment also as a structurally plastic system, then the system and the environment will have an interlocked history of structural transformations, selecting each other's trajectories.«³³ Nur weil ein solches System von seinem *environment* abgeschlossen ist, aber in einem komplexen Verhältnis struktureller Kopplung zu ihm steht, kann es Autonomie entwickeln.³⁴ Der Organismus erkennt nur das in seiner Außenwelt, was Teil seiner Autopoiesis wird.

Bourgine und Varela übernehmen gut zwanzig Jahre nach der ersten Formulierung dieses Konzepts die Prinzipien biologischer Organismen und fordern, sie in abgewandelter Form – Autopoiesis ist Varela zufolge auf biologische Systeme beschränkt³⁵ – auf die Konstruktion künstlicher Organismen anzuwenden. Auch autonome Systeme wie Roboter oder selbstfahrende Autos haben demnach keinen Zugang zur Außenwelt, sondern operieren auf der Grundlage sensorischer Daten – zumeist in digitaler Form – und müssen ihr *environment* selbst herstellen. Ein autonomes und geschlossenes technisches System bringt zwar nicht alle Komponenten seines Operierens selbst hervor, reagiert aber auf seine Umgebung so, wie es die interne Selbstorganisation erlaubt. Gemeinsam mit Bourguine skizziert Varela ein Verständnis von Autonomie, das die Verflechtung des Systems mit seinem *environment* in den Mittelpunkt stellt und die Intensität dieser Kopplung trotz der Schließung sowohl zum Maßstab der Autonomie als auch zum Konstruktionsprinzip macht.

Diese Systemarchitektur stützt sich auf den konnektivistischen Ansatz, an den Bourguine und Varela 1991 erfolgreich anschließen und der seitdem weite Teile der KI-Forschung dominiert. In Fortsetzung von Ashbys Überlegungen erklärt dieser Ansatz Autonomie durch die strukturelle Kopplung von Organismus und *environment* bei operationaler Geschlossenheit des Organismus: »Autonomy in this context refers to their [the autonomous system's] basic and fundamental capacity to be, to assert their existence and to bring forth a world that is significant and pertinent

32 Varela, Francisco J. (1979): *Principles of Biological Autonomy*. New York, North Holland. S. 33.

33 Ebd.

34 Claus Emmeche hat ähnliche Fragen für den *Umwelt*-Begriff durchgespielt: Emmeche, Claus: »Does a Robot have an Umwelt? Reflections on the Qualitative Biosemiotics of Jakob von Uexküll«. In: *Semiotica* 134/1/4 (2001), S. 653-693.

35 Varela (1979): *Principles of Biological Autonomy*. S. 54.

without being pre-digested in advance.«³⁶ Artikuliert wird hier eine Kritik an repräsentationalistischen KI-Modellen, die dazu tendieren, dem Roboter eine Welt vorzugeben, die vom Forscher definiert wird. Für Bourguine und Varela hingegen resultiert Autonomie nicht nur in angemessenem Problemlösungsverhalten technischer Systeme, sondern im Hervorbringen von Welten – d.h. von unterschiedlichen Interpretationen des *environments*.³⁷ Die Organisation des Systems ist aufgrund von dessen Autonomie dazu in der Lage, sich in struktureller Kopplung mit dem *environment*, aber operational geschlossen selbst zu verändern und gleichsam im Inneren neue Welten entstehen zu lassen, weil das System keinen Zugang zur Außenwelt hat – so wie ein autonomes Fahrzeug nur über Sensordaten verfügt, aus denen Wahrscheinlichkeiten berechnet werden. Operational entstehen diese Welten dadurch, dass dem autonomen System zur Adaption an die fluktuierenden Bedingungen des *environments* stets mehrere gleichermaßen mögliche Optionen des Verhaltens offenstehen müssen, es also unterschiedliche Möglichkeiten seiner Restrukturierung geben muss. Bourguine und Varela rekurren zu diesem Zweck auf die Annahme der Viabilität, die besagt, dass ein autonomes System angesichts eines »unpredictable or unspecified environment«³⁸ durch die dynamische Organisation seiner Geschlossenheit nicht eine determinierte, einzelne Option zur Lösung der Herausforderungen des *environments* entwickelt, sondern eine Pluralität möglicher Lösungen. Ohne diese Offenheit wäre das geschlossene System nicht autonom. Die Offenheit der Autonomie bedeutet hier nicht, dass das System frei

36 Bourguine/Varela: »Towards a Practice of Autonomous Systems«, S. XIII. Hervorhebung im Original. Varela erläutert diese Prinzipien in seinem Buch *Principles of Biological Autonomy* von 1979, dem ein Zitat aus Lawrence J. Hendersons *The Fitness of the Environment* vorangestellt ist. Seine Unterscheidung in *environment* und *world* ist offensichtlich von Uexkülls Unterscheidung in *Umgebung* und *Umwelt* inspiriert.

37 Das *worlding*, das im Sinne Donna Haraways die exkludierende Gegenüberstellung von Organismus und *environment* durch ihre symbiotische Verschränkung und das gegenseitige Hervorbringen von Welten ersetzen soll, ist als konstruktivistischer Ansatz mit der Geschichte der Kybernetik verwoben. Im Kontext eines von Alfred Tauber herausgegebenen Sammelbands über *Organisms and the Idea of Self*, der die später von Tauber gemeinsam mit Scott Gilbert und Jan Sapp formulierte Idee des Holobionten vorwegnimmt, die auch den Fluchtpunkt von Haraways Arbeiten bildet, fasst Varela die Operationalisierbarkeit ökologischer Relationen in folgende Worte: »The key point, then, is that the organism brings forth and specifies its own domain of problems and actions to be ›solved‹; this cognitive domain does not exist ›out there‹ in an environment that acts as a landing pad for organisms that somehow drops or is parachuted into the world. Instead, living beings and their worlds of meaning stand in relation to each other through mutual specification or co-determination. [...] Environmental regularities are the result of a conjoint history, a congruence which unfolds from a long history of co-determination.« (Varela, Francisco J.): »Organism. A Meshwork of Selfless Selves«. In: Tauber, Alfred I. (Hg., 1991): *Organism and the Origins of Self*. Dordrecht, Kluwer, S. 79-108. Hier: S. 103.

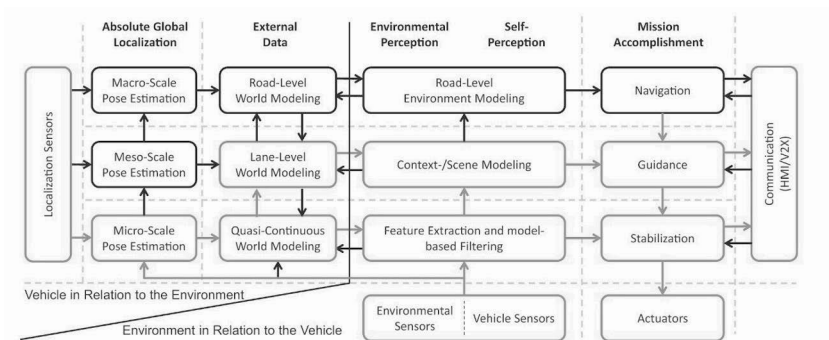
38 Bourguine/Varela: »Towards a Practice of Autonomous Systems«. S. XIII.

zwischen beliebigen Optionen wählen kann, sondern dass seine Organisation auf variable, aber nicht auf beliebige Weise an das *environment* adaptiert ist.

Ein autonomes System braucht also Varela und Bourguine zufolge eine Offenheit möglicher Reaktionen, um auf Ereignisse in seiner Umgebung reagieren zu können und sich ihr anzupassen. Wäre es allein auf determinierte Reaktionen festgelegt, könnte es nicht in ein reziprokes Verhältnis zu seiner Umgebung eintreten. Diese Offenheit ist jedoch kein ontologischer Zustand des autonomen Systems, sondern im Fall selbstfahrender Autos auf ihre probabilistischen Verfahrensweisen zurückzuführen, die durch das *world* bzw. *scene modeling* umgesetzt werden. Innerhalb der Architektur autonomer Fahrzeuge haben die unter diesen Namen zusammengefassten Verfahren eine zentrale Funktion für ihr Verhalten gegenüber der Umgebung.

Die autonomen Umgebungstechnologien, die seitdem entstanden sind, sind in diesem Sinn in unterschiedlichen Entwicklungsschritten mit Umgebungsrelationen befasst, weil sie nicht als isolierte Maschinen, sondern nur in ihrer Relation mit der Umgebung operieren können. Da sie reziprok mit der Umgebung verschränkt sind, müssen sie, um sich in dieser Umgebung bewegen und mit ihr interagieren zu können, diese Relationen in ihren Operationen reproduzieren. Im Gegensatz zu den Robotern, zellulären Automaten und künstlichen Organismen der Vergangenheit verfügen heutige autonome Maschinen über eine Vielzahl leistungsfähiger Sensoren und komplexe Algorithmen zur Filterung sensorischer Daten. Die technischen Herausforderungen bestehen gegenwärtig in der Synthetisierung der Datenströme, der Optimierung von Machine Learning und der Anpassung der Algorithmen an unvorhersagbare Ereignisse.

Abbildung 7.1 – Abstraction Levels of Methods for the Environmental Perception



Quelle: Matthaei, Richard/Maurer, Markus: »Autonomous Driving. A Top-Down-Approach«.

In: *Automatisierungstechnik* 63/3 (2015), S. 155-167. Hier: S. 159.

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.³⁹ 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

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