

# NAVIGATIONEN UND RELATIONEN

Eine medientheoretische Skizze und ein interplanetarisches Beispiel

VON FLORIAN SPRENGER

## ABSTRACT

Der Beitrag stellt im ersten Teil drei Vorschläge vor, mit denen Navigation medientheoretisch gefasst werden kann: Als eine Praxis des Umgangs mit Relationen; als eine Praxis des Umgangs mit Nicht-Wissen; und als eine Skalierungspraxis. Dieses relationale Verständnis von Navigation dient im zweiten Teil als Ausgangspunkt für eine Beschäftigung mit der Navigation autonomer Maschinen, die in der Lage sind, sich an ihre Umgebung zu adaptieren. Im dritten Teil wird dies auf das Beispiel des Marsrovers Perseverance angewendet. Navigation wird so als Modus des Als-Ob innerhalb einer Virtualität möglicher Relationen zur Umgebung verständlich. Navigation wird so medienkulturwissenschaftlich verortet und als skalierbare und relationale Praxis analysierbar.

KEYWORDS: Marsrover, Raumfahrt, Robotik, Navigation, Virtualität

I.

*Navigation ist eine Praxis des Umgangs mit Relationen. Wer navigiert, weiß, wo er, sie oder es sich befindet, nur aus dem medial ver- oder kulturtechnisch ermittelten Verhältnis zu anderen Objekten (Wänden, Sternen, Satelliten, Straßenschildern) oder durch Repräsentationen dieser Relationen auf imaginären, geographischen oder digitalen Karten. Wer navigiert, orientiert sich also durch ein Ins-Verhältnis-Setzen und bewegt sich durch den Bezug auf diese Verhältnisse, die sich mit jeder Bewegung verändern. Verhältnisse und Relationen sind die Sache von Medien. (Kultur-)Techniken und Medien der Navigation ermitteln über die Messung von Relationen das Verhältnis der Relata und verorten sie in ihrem Verhältnis zueinander. Navigation ist mit einem relationalen Konzept des Raums verknüpft, weswegen die Angabe einer Lage oder Position die Angabe eines Bezugspunkts oder Bezugssystems voraussetzt. So wird es möglich, die Relata auch dann in Relation zu bestimmen, wenn sich die Relata bewegen. Navigation wird, in anderen Worten, durch die Bewegung erschwert, die sie ermöglicht. Dies betrifft die räumliche Achse der Navigation auf doppelte Weise, weil sich das Objekt selbst bewegt und sich dadurch zugleich die Relationen zu seiner Umgebung ändern. Auch auf der zeitlichen Achse ist das navigierende Objekt nicht unabhängig von seinen Relationen. Bestimmbar und berechenbar müssen nicht nur gegenwärtige, sondern auch vergangene und zukünftige Orte sein, zwischen denen sich das Objekt bewegt und einem Pfad folgt. Die Relationen des Navigierens sind also nicht gegeben, sondern*

werden beständig neu bestimmt und dabei von den Maßen der Medien hervorgebracht.

*Navigation ist eine Praxis des Umgangs mit Nicht-Wissen.* Ort und Bewegung eines Objekts können aus physikalischen Gründen nie zugleich bestimmt werden. Daher ist das Wissen über Relationen immer unsicher. Navigation projiziert notwendigerweise die eigene Position in eine zu erreichende Zukunft. Ob man dort ankommt, ist ungewiss. Das Nicht-Wissen der Navigation betrifft also sowohl die Bestimmung des eigenen Orts als auch die Projektion der Bewegung. Navigation bedeutet daher, den eigenen Ort, den Pfad zum Ziel oder das Ziel selbst beständig zu korrigieren. Praktiken der Navigation operieren mit Feedbackschleifen und Rekursionen, die eine Aktualisierung des Wissens über die eigene Position mit dem Horizont des Nicht-Wissens über die eigene Bewegung koppeln. Die navigierende Bewegung im Raum ist ständig vom Problem der Verifizierung des Wissens bzw. Nicht-Wissens begleitet, das Navigation zugrundeliegt: die Kollision ist eine Form der Konsolidierung dieses Wissens, denn sie bricht die Bewegung ab und definiert damit zumindest eine Dimension des Ortes des navigierenden bzw. navigierten Objekts.

*Navigation ist eine Skalierungspraxis.* Sie kann die Bewegung durch ein Zimmer, eine Stadt oder einen Kontinent umfassen. Aber auch wenn sie stets Relationen nutzen, sind navigatorische Verfahren der Relationierung nur bedingt skalierbar – die Position der Sterne hilft nicht, wenn ich den Weg zum Seminarraum suche und das Wissen um die Position von Türen in einem Gebäude ist bei einer Reise in ein anderes Land wenig hilfreich. Navigation setzt also ein Wissen um die Skalen der relevanten Relationen voraus – und unter Umständen die Fähigkeit, unterschiedliche Navigationsskalen so zu verbinden, dass Navigation auch über Skalenwechsel hinaus erfolgreich ist. Man muss, in anderen Worten, den Maßstab jeder Karte kennen, die man zur Navigation nutzen will, d.h. ihre Relationen zu den kartografierten Objekten. Quer durch die Stadt zu fahren, das Rad abzustellen, ein Buch in der Bibliothek zu finden und sich dann auf einen Stuhl zu setzen, umfasst Navigationspraktiken auf unterschiedlichen Skalierungsebenen, deren Wechsel nicht bewusst sein mögen, die aber mitunter sehr unterschiedliche Fähigkeiten, Kulturtechniken und Medien erfordern.

2.

Welchen Bedingungen unterliegt Navigation, wenn der Akteur, der navigiert, kein Mensch ist, der oder die sieht und hört, Entfernungen schätzt und Medien der Navigation nutzt? Wenn Maschinen sich selbst bewegen, müssen auch sie Relationen hervorbringen, um sich eigenständig im Raum zu orientieren und ein Ziel anzusteuern. Dabei spielen die drei eingangs vorgestellten Dimensionen von Navigation eine zentrale Rolle. Im Folgenden soll daher maschinische Navigation an einem Beispiel skizziert werden, das mehrere Millionen Kilometer vom nächsten Menschen entfernt ist: dem Marsrover Perseverance. Da dieser mit vergleichsweise einfacher

Technik ausgestattet ist, die zudem sehr gut dokumentiert ist, bietet sich dieses Beispiel zur Annäherung an Navigationsverfahren an, die auch von autonomen Autos, Drohnen und Robotern jeglicher Art genutzt werden.

Keine Maschine hat von sich aus Informationen über die räumlichen Relationen, in denen sie steht. Um ihr dennoch Navigation zu ermöglichen, gibt es unterschiedliche Lösungen: Ein Roboter kann sich mittels Trial-and-Error so lange durch einen gegebenen Raum bewegen, bis er sein Ziel erreicht hat (etwa wie ein einfacher robotischer Rasenmäher oder Staubsauger, der im vorgegebenen Zeitraum durch den Raum fährt und an jeder Wand die Richtung wechselt). Ein Roboter kann über eine vorprogrammierte Karte und einen Pfad zum Ziel verfügen, so dass er lediglich seine Route nachkorrigieren und anhand der Karte seinen Ort prüfen muss. Doch die eigentliche Herausforderung für robotische Navigation sind Roboter, die nichts über ihren Ort und nichts über ihre Umgebung wissen, aber auf deren Unsicherheit zeitkritisch reagieren sollen, um autonom zu navigieren. Dabei müssen alle drei Dimensionen von Navigation technisch operationalisiert werden.

Diese Herausforderung von Navigation bei radikalem Nicht-Wissen stellt sich gegenwärtig überall dort, wo immer leistungsfähigere Maschinen sich autonom durch Umgebungen bewegen, seien es Roboter, Drohnen oder selbstfahrende Autos. Im Gegensatz zu menschlichen Navigator:innen können solche Maschinen sich nicht auf Bezugspunkte im Außerhalb verlassen, sondern sind sowohl mit der Unsicherheit über ihre eigene Position als auch mit der Unvorhersagbarkeit von dessen Dynamik konfrontiert. Eingesetzt werden zur Lösung dieses Problems zahlreiche Technologien für unterschiedliche Skalen des Navigierens: GPS und digitale Karten, Entfernungs-, Geschwindigkeits-, MEMS-, Lage- und Beschleunigungssensoren sowie Lidar-, Radar- oder Kamerasensoren, deren Daten mittels Filteralgorithmen zu virtuellen Modellen der Umgebung zusammengesetzt werden.

Angesichts der Vielfalt dieser Relationierungsverfahren ist etwa ein (semi-)autonomes Auto stets auf mehreren Skalenebenen zugleich mit Navigationsverfahren beschäftigt: auf strategischer Ebene mit der kartografischen Navigation zwischen zwei geographischen Orten, auf der taktischen Ebene mit dem Erkennen der jeweiligen Situation etwa einer Straßenkreuzung und auf der operationalen Ebene mit der Navigation im eigenen Nahfeld zur Vermeidung von Kollisionen, zum Spurhalten oder zum Einparken.<sup>1</sup> 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. Auf der strategischen Ebene werden Routen berechnet, auf der taktischen Ebene virtuelle Umgebungsmodelle erzeugt und auf der operationalen Ebene das Fahrzeug manövriert. Ein (semi-)autonomes Auto muss sich auf diesen drei Ebenen in Relation setzen und benötigt dazu die genannten Technologien.

Um sich in den komplexen Umgebungen des Straßenverkehrs zu bewegen, muss ein autonomes Fahrzeug also kontinuierlich die Zustände – Form, Position

---

<sup>1</sup> Vgl. Matthaei/ Maurer: »Autonomous Driving. A Top-Down-Approach«, S. 155-167.

und Bewegung – der umgebenden Objekte registrieren und sich selbst in Relation zu ihnen lokalisieren.<sup>2</sup> Es hat keinen Zugriff auf einen Blick von außen, sondern muss seinen eigenen Ort und mögliche Reaktionen auf seine Umgebung auf allen drei Operationsebenen immer wieder neu berechnen. Da sowohl das Fahrzeug als auch andere Verkehrsteilnehmer:innen 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 oder Akteuren gegeben. Seine Umgebung 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. Die technische Herausforderung besteht, anders gesagt, in einem sicheren Umgang einerseits mit der Unsicherheit des autonomen Systems über seine Umgebung sowie andererseits mit der Unvorhersagbarkeit des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer:innen. Navigation bedeutet für ein autonomes System also Sicherheit im Umgang mit dieser doppelten Unsicherheit (des Systems über seinen eigenen Zustand wie der Umgebung).

3.

Am 18. Februar 2021 landet der fünfte NASA-Rover mit dem Namen Perseverance im Jezero-Krater auf dem Mars.<sup>3</sup> Mit seinen Fähigkeiten, Löcher zu graben, Steine zu pulverisieren, Spektralanalysen zu erstellen und mittels einer integrierten Drohne Luftaufnahmen zu machen, soll Perseverance an Stelle des Menschen eine Umgebung erkunden, die uns auf radikale Weise unzugänglich ist.

Die Aufgabe von Perseverance ist es, das Gebiet des Kraters zu erkunden. Dazu verfügt der Rover über drei Navigationsmodi, die für unterschiedliche Situationen geeignet sind. Alle drei Modi unterliegen einer Reihe von Einschränkungen: Erstens sind jedes Risiko und Verschleiß zu vermeiden, weshalb jeder Schritt ausführlich geplant wird und der Rover sich täglich nur wenige Meter bewegt. Zweitens ist nur sehr einfache Technik für die Nutzung auf der strahlenbelasteten Oberfläche des Mars geeignet, weshalb der Rover nur über einen langsamen Prozessor

---

2 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: »Die Kunst des Möglichen III. Grundlinien einer dialektischen Philosophie der Technik«, S. 131 f.

3 Zum Überblick über diese Mission vgl. Williford u.a. »The NASA Mars 2020 Rover Mission and the Search for Extraterrestrial Life«, S. 275-308 sowie Clancey: *Voyages of Scientific Discovery with the Mars Exploration Rovers 2012*.

und keine Laser-, Lidar- oder Sonarsensoren verfügt. Stattdessen operiert er sowohl zur Navigation als auch zur Sammlung und Analyse von Proben mit optischen Kameras sowie Beschleunigungs- und Bewegungsmessern. Drittens schließlich braucht ein Signal von der Erde zum Mars je nach Entfernung zwischen vier und zweiundzwanzig Minuten. Da das bestehende Satellitennetzwerk auch für andere NASA-Projekte genutzt wird, ist eine Datenübertragung nur einmal am Tag möglich.

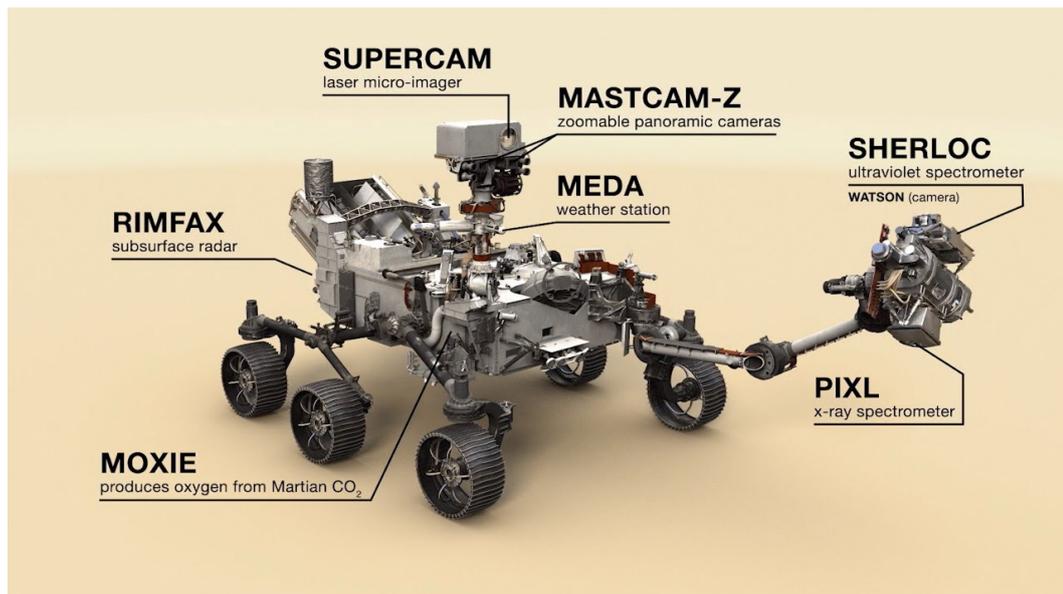


Abb. 1: Nasa-Rover Perseverance (Quelle: NASA).

Der Rover ist also auf sich selbst gestellt. Er ist dabei trotz der Entfernung zur Erde kein isolierter Roboter, sondern kann als ausführender Bestandteil eines interplanetarischen Akteurs-Netzwerks verstanden werden, das unter anderem aus dem Deep Space Network und dem Mars Reconnaissance Orbiter, aber auch 16 FahrerInnen und 400 WissenschaftlerInnen besteht, die täglich im Jet Propulsion Laboratory in Pasadena damit beschäftigt sind, die gesammelten Daten – und über nichts anderes als digitale Daten vom Mars verfügen wir – auszuwerten.

Diese Einschränkungen setzen den Rahmen für die drei Navigationsmodi, die im Vergleich zu avancierten irdischen Robotern zwar vergleichsweise simpel, aber gerade deswegen geeignet sind, um einige der Bedingungen (semi-)autonomer robotischer Navigation zu skizzieren. Um sich in der unbekannt und uns unerfahrbaren Umgebung des Mars zu bewegen, sind Perseverance und das Team auf der Erde in allen drei Modi darauf angewiesen, diese Umgebung mit einer Reihe von Sensoren aufzubereiten und aus den gesammelten Daten Modelle zu erstellen, mittels derer mögliche Routen durch das Gelände als virtuelle Möglichkeiten berechnet werden. Diese Modelle sind die Grundlage aller drei Navigationsmodi. Wie jeder Roboter muss Perseverance für die Bewegung in einer unbekannt Umgebung die umgebenden Objekte registrieren und sich in Relation zu ihnen verorten. Er hat

keinen Zugriff auf einen Blick von außen und weiß nie, wo er sich befindet. Sein Verhältnis zur Welt wird von sensoralgorithmischen Verfahren erzeugt, die Sensordaten mittels Filteralgorithmen zu Umgebungsmodellen zusammensetzen.

Der erste Modus ist die *blind navigation*. Mittels des eigens entwickelten Interface des *Rover Sequencing and Visualization Program* (RSVP) werden durch die Fusion aller Sensordaten dreidimensionale Visualisierungen des Rovers in seiner Umgebung erzeugt, mögliche Pfade sowie unterschiedliche Positionen des Rovers simuliert und textbasierte Befehle gesendet.<sup>4</sup> Von der Erde aus wird in RSVP ein Ziel festgelegt und der Rover fährt exakt den vorgegebenen Weg, also z.B. 2,20 Meter geradeaus und dann nach einer Drehung um 30 Grad 70 Zentimeter geradeaus (der Rover kann keine Kurven fahren und sich nur auf der Stelle drehen, um ungleichmäßigen Verschleiß der Räder zu vermeiden). Mit Methoden der Koppelnavigation (*dead reckoning*) und der Odometrie, bei denen durch die Achsendrehung, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit der erreichte Ort bestimmt wird, lokalisiert sich der Rover. Das Problem dabei: Je nach Geländestabilität können die Räder durchdrehen, so dass sich der Kurs während der Fahrt ändern kann. Der Rover schätzt also nur, wo er am Ende zu stehen kommt und ob er sein Ziel erreicht hat. Dieser Navigationsmodus ist daher lediglich für bereits bekanntes und ungefährliches Terrain geeignet.

Die zweite Navigationsmöglichkeit basiert auf der sogenannten *Visual Odometry*.<sup>5</sup> Ein grober Pfad zu einem Ziel wird von der Erde aus festgelegt, aber der Rover korrigiert während der Fahrt die genaue Route, indem stereoskopische Aufnahmen der Umgebung verglichen werden. Dieser Modus ist zwar deutlich langsamer als blindes Fahren, aber genauer und sicherer, weil der Rover auch vorab nicht identifizierte Hindernisse, Gefälle und Unebenheiten erkennt. Allerdings ist er nur für Gelände geeignet, das ausreichende Merkmale, Kontraste und Texturen etwa in Form von prägnanten Felsen aufweist.

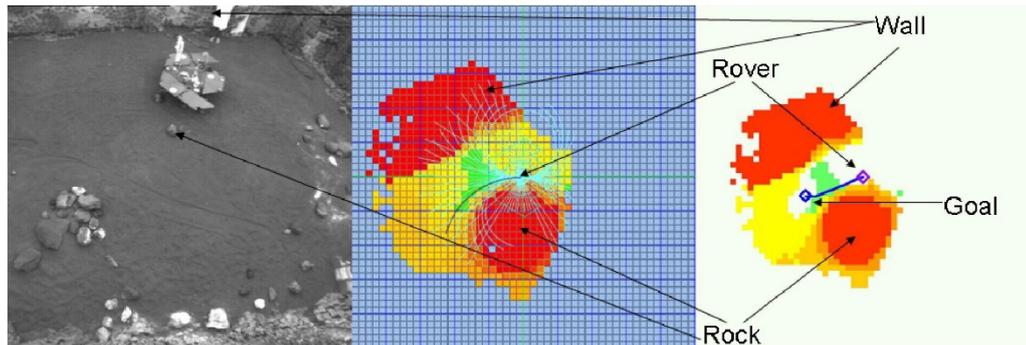
In diesem Modus hält der Rover nach maximal einem Meter an und macht ein Foto. Mittels algorithmischer Filter (in diesem Fall einer Weiterentwicklung des Extended Kalman Filter) werden die zu unterschiedlichen Zeitpunkten von unterschiedlichen Positionen aus aufgenommenen Bilder bzw. digitalen Daten miteinander verglichen, indem eindeutig identifizierbare Marker und Korrelationen bestimmt werden. Die Überlagerung der Bilder ergibt Wahrscheinlichkeitswerte

---

4 Vgl. Wright u.a.: »Driving on Mars with RSVP. Building Safe and Effective Command Sequences«, S. 37-45.

5 Vgl. Maimone u.a.: »Two Years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers«, S. 169-186; Yousif u.a.: »An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM. Applications to Mobile Robotics«, S. 289-311 sowie Johnson: »Robust and Efficient Stereo Feature Tracking for Visual Odometry«, S. 39-46. Entwickelt wurde dieses Verfahren von Moravec: *Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover* und Matthies: *Dynamic Stereo Vision*. Visual Odometry ist eine lokale Navigationsleistung, während SLAM-Verfahren eine Karte erzeugen. Der Vorzug der Odometrie im Vergleich zu SLAM besteht darin, dass die Daten über gefahrene Distanzen leichter integriert werden können.

für die Positionen und Konturen von Objekten sowie das Gelände. So kann der Rover sowohl seine eigene Position lokalisieren als auch potentiell gefährlichen Objekten ausweichen und Stellen vorhersagen, an denen er vom Kurs abkommen oder steckenbleiben könnte. Der Rover ist in der Lage, diese Berechnungen eigenständig zu leisten, um in komplexem Gelände an der vorgegebenen Route orientiert, ihr aber nicht blind folgend, möglichst exakt zu einem vorgegebenen Marker zu fahren.



**Figure 5.** The left image is an overhead view of the rover. The middle image is the corresponding goodness map, and the Field D\* cost map is shown in the right image. Blue cells have unknown traversability. All other cells are colored based on a gradient between green (high goodness/low cost) and red (low goodness/high cost). Note that the entire goodness map is presented, but only a small portion of the cost map is shown in here.

Abb. 2: Traversability-Karte (Quelle: Carsten/Rankin/Ferguson/Stentz 2007).

Der dritte Modus *Autonav* wurde erstmals 2013 vom Vorgängerrover Curiosity verwendet, um unbekanntes Gelände zu durchqueren, für das die Teams auf der Erde kein Bildmaterial hatten. Bei diesem Modus wird lediglich ein Ziel vorgegeben und der Rover versucht, autonom den besten Pfad zu finden.<sup>6</sup> Dieses Verfahren besteht aus zwei Schritten: Im ersten Schritt wird aufbauend auf den Daten der Visual Odometry eine Gefahrenkarte der Umgebung erzeugt. Die Bildpaare aller Kameras werden durch Sensordatenfusion zu einem Modell zusammengefügt, das mittels eines sogenannten *occupancy grid* in Quadranten unterteilt wird, die etwa so groß wie die Räder des Rovers sind. Jeder Quadrant erhält mittels des Algorithmus *Gestalt* (*Grid-based Examination of Surface Traversability Applied to Local Terrain*) einen Wahrscheinlichkeitswert für ein Hindernis, ein Gefälle oder eine Unebenheit und wird in rot, gelb oder grün als Kategorien der *traversability* klassifiziert.<sup>7</sup> Diese Gefahrenkarte wird im zweiten Schritt zur Datengrundlage des sogenannten *Approximate Clearance Evaluation*-Algorithmus (ACE), der aus der dreidimensionalen Karte

6 Vgl. Abcouwer u.a.: »Machine Learning Based Path Planning for Improved Rover Navigation«, S. 1-9.

7 Vgl. Biesiadecki/Maimone: »The Mars Exploration Rover Surface Mobility Flight Software. Driving Ambition«, S. 1-15; Atikah/Bade: »Path Planning Algorithm in Complex Environment. A Survey«, S. 31-40 sowie Helmick u.a. »Terrain Adaptive Navigation for Planetary Rovers«, S. 391-410.

alle möglichen Pfade und Positionen extrahiert.<sup>8</sup> Im Vergleich zu den Vorgängermodellen erlaubt dieser Algorithmus auch, über kleine Objekte zu fahren, während bisher um jedes potentiell gefährliche Objekt eine unbefahrbare Zone in der Größe des Rovers gelegt wurde.

Hier kommt ein neuer Modus der Virtualisierung ins Spiel, denn in diesem Schritt wird eine Pluralität möglicher Welten technisch operationalisiert. Der Algorithmus berechnet mögliche Pfade, indem er einen baumförmigen Graphen erstellt, dessen Äste Optionen unterschiedlicher Fahrtrichtungen angeben. Der erste Abschnitt umfasst 14 Ausrichtungen des Rovers (incl. Umkehren), gefolgt von zwei Abschnitten mit jeweils elf Ausrichtungen, denen für je drei Meter gefolgt wird. Der Rover berechnet also für die vorgesehene Strecke von sechs Metern pro Runde 1694 mögliche Pfade (14x11x11). Jedem Pfad wird anhand der Gefahrenkarte und ihren Wahrscheinlichkeitswerten ein Kostenfaktor zugeteilt und die Liste möglicher Pfade anhand dieser Kosten geordnet. Der Pfad mit der geringsten Gefahr wird ausgewählt. Der Rover fährt aber nicht den ganzen Pfad, sondern nur das erste Manöver – entweder einen Meter geradeaus oder die erste Drehung – und wiederholt den Vorgang, bis er am Ziel angekommen ist.

Der Vorteil dieses Navigationsmodus liegt in der Autonomie des Rovers, der sich unabhängig von der Erde an sein Ziel begibt und dabei auch unbekanntes Gelände durchqueren kann. Aufgrund der benötigten Rechenzeit ist dieser Modus zwar der langsamste, kann dafür aber kontinuierlich zwischen zwei Kommunikationsfenstern mit der Erde durchgeführt werden. Allerdings können Sand und kleine, spitze Steine dabei nur unzureichend erkannt werden – dafür braucht es weiterhin menschliche Augen und Erfahrung im »visual judgement«<sup>9</sup>. Dieser Modus ist also nur für bestimmtes Gelände geeignet, spart dort aber viel Bandbreite, die zur Übermittlung wissenschaftlicher Daten genutzt werden kann.

In allen drei Modi wird jeder Schritt – ob vor Ort oder auf der Erde – vorab durchgespielt. Navigation ist für den Rover also zunächst ein Proberaum des Als-Ob. Im Virtuellen wird anhand eines Modells oder auch einer künstlichen Sandbox auf der Erde die Bewegung auf dem Mars durchgespielt. Das Spielen ist hier durchaus wörtlich gemeint: Um möglichst sicher zu navigieren, müssen unterschiedliche Optionen möglichen Verhaltens verglichen und gegeneinander aufgewogen werden – ob algorithmisch vom Rover selbst oder mit Hilfe von Simulationen, dem Testparcours und Diskussionen auf der Erde. Jeder Aktion des Rovers geht eine Vielzahl virtueller Als-Obs voraus. Er verfügt also stets über eine Alternative zu dem, was er tut. Er könnte zumindest potentiell eine andere Aktion wählen, auch wenn die Voraussetzungen zur Entscheidung für eine Aktion klar definiert sind. Diese Alternativität ist die Bedingung für die operative Autonomie des Roboters, die ihm eine basale eigenständige Navigation ermöglicht. Im Modus semiautonomer Navigation

---

8 Vgl. Otsu u.a.: »Fast approximate clearance evaluation for rovers with articulated suspension systems«, S. 768-785.

9 Vgl. ebd.

verfügt der Rover über keine einzelne, determinierte Lösung für die Durchquerung eines Geländeabschnitts, sondern über eine Vielzahl von Optionen mit unterschiedlich wahrscheinlichen Zuständen oder Ergebnissen. Aufgrund dieser Vielfalt und der in ihr enthaltenen Relationen ist er in der Lage, in unterschiedlichen Umgebungen zu navigieren.

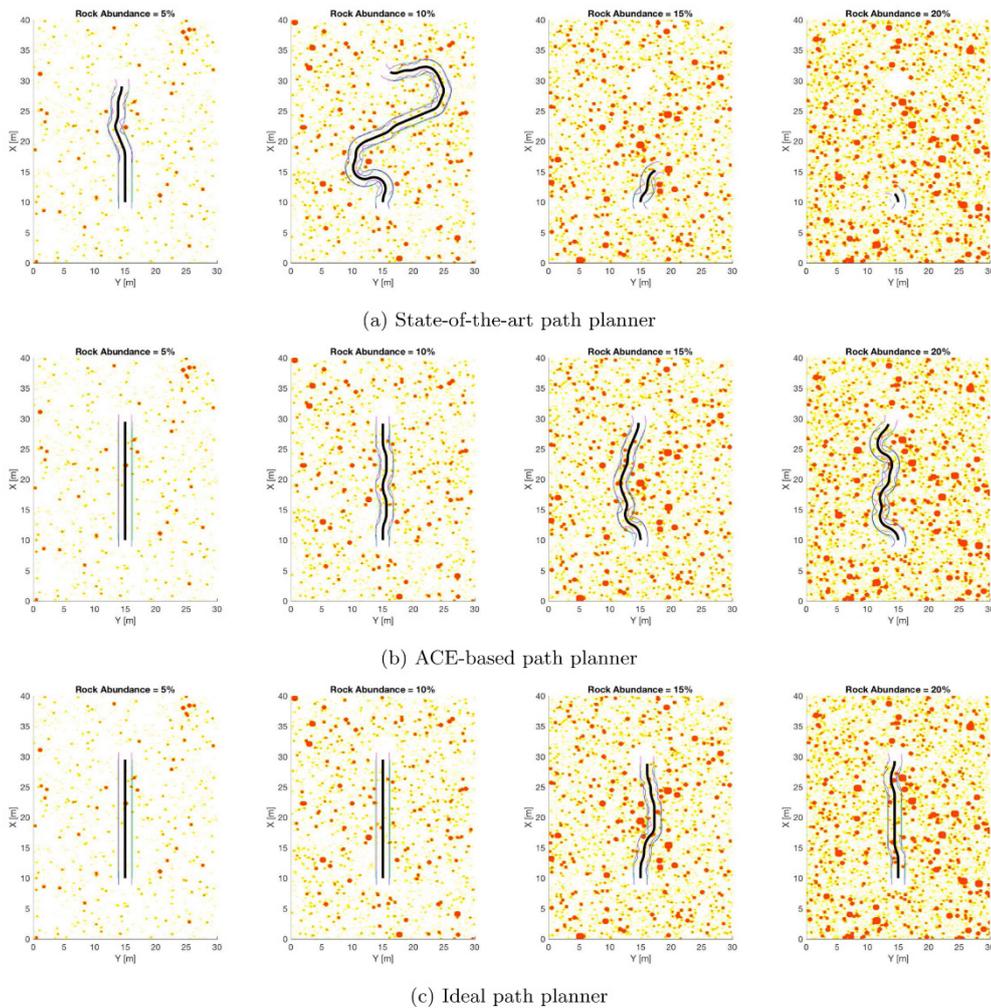


Abb. 3: Fast Approximate Clearance Evaluation (Quelle: Otsu/Matheron/Ghosh/Toupet/Ono 2019, S. 780).

Der Rover ist keine Reiz-Reaktions-Maschine, sondern hat einen Ort und eine Zeit im Verhältnis zur Welt, ohne dass er je Zugriff auf die Realität hätte. Zugriff auf die Welt hat er nur durch ein virtuelles Modell dieser Welt, das die Berechnungsgrundlage möglicher Navigation in der Welt ist. Deswegen ist er darauf angewiesen, ständig mit der Welt zu interagieren, um sich in ihr zu verorten. Er ist rekursiv an die Welt gekoppelt, um sich in virtuellen Welten durch die Welt zu bewegen. Ohne ein Verhältnis zur Welt wäre er zu all dem nicht in der Lage.

4.

Am Beispiel des Rovers zeigt sich also, welche Rolle die drei eingangs erläuterten Aspekte von Navigation für autonome Systeme spielen: Sie verfügen erstens über nichts anderes als sensorische (und damit unspezifische) oder sensoalgorithmische (und damit probabilistische) Relationen zu ihrer Umgebung. Bei besonders avancierten Systemen werden diese Daten zu virtuellen Modellen zusammengesetzt, die wiederum als Karten dienen und Optionen der Navigation durchzuspielen erlauben. Aber auch eine einfache Entfernungsmessung durch einen Infrarotsensor stellt eine Relation her. Die Verfahren der Relationierung operieren zweitens auf der Grundlage von Nicht-Wissen, denn der Rover verfügt stets nur über Wahrscheinlichkeiten für mögliche Objekte und Pfade an ihnen vorbei. Auch eine Kollision gibt lediglich die Information, dass etwas im Weg steht. Schließlich beziehen sich Navigationsverfahren drittens immer auf eine spezifische Skalierungsebene. Perseverance navigiert im Nahfeld und plant im Autonav-Modus die nächsten Meter, die auf einer Umgebungskarte mit einem weiter entfernten Tagesziel abgeglichen werden. Operativ sind die Navigationsmodi durch ihre Skalengebundenheit unterschieden, auch wenn sie miteinander verknüpft werden können. Mit seinen sensoalgorithmischen Verfahren allein wäre Perseverance aber nicht in der Lage, ein entferntes Ziel zu erreichen – dafür sind die Operatoren und geographische Karten auf der Erde nötig.

Die Navigation autonomer Maschinen, so wird hier deutlich, besteht aus vielschichtigen und sehr unterschiedlichen Verfahren, die die Maschine in ein Verhältnis zur Welt setzen, ohne jemals einen direkten Zugang zur Welt zu haben. Diese Verfahren sind nicht in der Lage, die Welt als Repräsentation zu operationalisieren, können aber vorgegebene repräsentationale Karten nutzen bzw. durch ihre Bewegung eine Karte erstellen.<sup>10</sup> Die Navigationen autonomer Maschinen sind relationale Verfahren des Umgangs mit Nichtwissen auf getrennten Skalen. Und das wiederum bedeutet, dass die Einführung dieser Technologien, der Umgang mit ihnen etwa im Straßenverkehr oder bei der Erkundung des Mars, mit einer Beschäftigung mit ihrer Probabilistik, ihrer sensoalgorithmischen Virtualität und ihrem Verhältnis zur Welt einhergehen sollte. Diese Maschinen machen keinen Unterschied zwischen einem Straßenschild und einem Menschen. Wenn sie aber Interaktionsräume eröffnen, in denen Menschen mit Maschinen zusammentreffen, rekonfigurieren sie die Bedingungen der Bewegung aller Akteure in diesen Räumen und damit die Möglichkeit des Zusammentreffens oder der Kollision. Die Zukunft der Navigation ist relational, unsicher und noch nicht endgültig skaliert.

---

10 Vgl. Kanderske/Thielmann: »Simultaneous localization and mapping and the situativeness of a new generation of geomeia technologies«, S. 118-132 sowie Sprenger: Epistemologien des Umgebens. Zur Geschichte, Ökologie und Biopolitik künstlicher Environments 2019, S. 484-497.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Abcouwer, Neil u.a./Daftry, Shreyansh/del Sesto, Tyler/Toupet, Oliver/Ono, Masahiro/Venkatraman, Siddarth/Lanka, Ravi/Song, Jialin/Yue, Yisong: »Machine Learning Based Path Planning for Improved Rover Navigation«, in: IEEE Aerospace Conference, 2021, S. 1-9.
- Biesiadecki, J. J./Maimone, M. W.: »The Mars Exploration Rover Surface Mobility Flight Software. Driving Ambition«, in: IEEE Aerospace Conference, 2006, S. 1-15.
- Carsten, Joseph/Rankin, Arturo/Ferguson, Dave/Stentz, Anthony: »Global Path Planning on Board the Mars Exploration Rovers«, in: 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007, S. 1-11.
- Clancey, William J.: Voyages of Scientific Discovery with the Mars Exploration Rovers, Cambridge, London 2012.
- Helmick, Daniel/Angelova, Anelia/Matthies, Larry: »Terrain Adaptive Navigation for Planetary Rovers«, in: Journal of Field Robotics 26, 2009, S. 391-410.
- Hubig, Christoph: Die Kunst des Möglichen III. Grundlinien einer dialektischen Philosophie der Technik Band 3: Macht der Technik, Bielefeld 2015.
- Janis, Atikah/Bade, Abdullah: »Path Planning Algorithm in Complex Environment. A Survey«, in: Transactions on Science and Technology 3, 2016, S. 31-40.
- Johnson, Andrew E./Goldberg, Steven B./Cheng, Yang/Matthies, Larry H.: »Robust and Efficient Stereo Feature Tracking for Visual Odometry«, in: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008, S. 39-46.
- Kanderske, Max/Thielmann, Tristan: »Simultaneous localization and mapping and the situativeness of a new generation of geomeia technologies«, in: Communication and the Public 4, 2019, S. 118-132.
- Maimone, Mark W./Cheng, Yang/Matthies, Larry: »Two Years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers«, in: Journal of Field Robotics 24, 2007, S. 169-186.
- Matthaei, Richard/Maurer, Markus: »Autonomous Driving. A Top-Down-Approach«, in: Automatisierungstechnik 63, 2015, S. 155-167.
- Matthies, Larry: Dynamic Stereo Vision. Dissertation, Pittsburgh 1989.
- Moravec, Hans P.: Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover. Dissertation, Pittsburgh 1980.
- Otsu, Kyohei/Matheron, Guillaume/Ghosh, Sourish/Toupet, Oliver/Ono, Masahiro: »Fast approximate clearance evaluation for rovers with articulated suspension systems«, in: Journal of Field Robotics 37, 2019, S. 768-785.
- Sprenger, Florian: Epistemologien des Umgebens. Zur Geschichte, Ökologie und Biopolitik künstlicher Environments, Bielefeld 2019.
- Williford, Kenneth H./Farley, Kenneth A./Stack, Kathryn M./Allwood, Abigail C.: »The NASA Mars 2020 Rover Mission and the Search for Extraterrestrial Life«,

in: Cabrol, Nathalie A./Grin, Edmond (Hrsg.), From Habitability to Life on Mars, San Diego, 2018, S. 275-308.

Wright, John/Hartman, Frank/Cooper, Brian/Maxwell, Scott/Yen, Jeng/Morrison, Jack: »Driving on Mars with RSVP. Building Safe and Effective Command Sequences«, in: IEEE Robotics & Automation Magazine 13, 2006, S. 37-45.

Yousif, Khalid/Bab-Hadiashar, Alireza/Hoseinnezhad, Reza: »An Overview to Visual Odometry and Visual SLAM. Applications to Mobile Robotics«, in: Intelligent Industrial Systems, 2015, S. 289-311.