

# RISIKOBEWUSSTE ROBOTER FÜR ERHÖHTE AUTONOMIE IN PLANETAREN EXPLORATIONSMISSIONEN

T. Schnell<sup>1</sup>, T. Büttner<sup>1</sup>, L. Puck<sup>1</sup>, C. Plasberg<sup>1</sup>, G. Heppner<sup>1</sup>, A. Rönnau<sup>1</sup>, R. Dillmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FZI Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, DE;

<sup>2</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, DE

## Zusammenfassung

Weltraummissionen sind aufwendige und teure Unterfangen, welche immer mit erheblichen Risiken verbunden sind. Aufgrund der harschen Umweltbedingungen und der hochkomplexen Robotersysteme werden zur Risikominimierung, bisher meist von einer Bodenstation, sichere und konservative Entscheidungen getroffen. Dies führt dazu, dass Robotersysteme in planetaren Explorationsmissionen bisher nicht ihr volles Potential entfalten können. Mit steigender Komplexität und zunehmender Entfernung von Missionszielen ist es sinnvoll, den Autonomiegrad der eingesetzten Roboter zu erhöhen und so ihre Leistungsfähigkeit zu steigern. Hierfür ist es nötig, dass Roboter eigenständig Entscheidungen treffen und der Planungsaufwand auf der Umsetzungsebene liegt. In dieser Arbeit wird ein System vorgestellt, welches einem Roboter eine Risikoeinschätzung vor Ort ermöglicht. Zum einen erhält der Roboter dafür eine Art „Selbstbewusstsein“, das auf der Überwachung und Einschätzung des eigenen Zustands beruht und es ermöglicht, die mit geplanten Aktionen verbundenen internen Risiken detailliert abzuschätzen. Zum anderen wird die Grundlage für ein umfassendes Umweltbewusstsein des Roboters geschaffen. In Kombination erlauben es Selbst- und Umweltbewusstsein dem Robotersystem vor Ort risikobewusste Entscheidungen autonom zu treffen. Dies beinhaltet unter anderem die das Risiko minimierende Auswahl aus verschiedenen möglichen Strategien und dynamisch an die aktuelle Situation angepasste risikobewusste Reaktionen. Die Risikobereitschaft des Roboters kann sich über die Zeit ändern. Dies kann genutzt werden um riskantere Aktionen in schwierigen oder scheinbar ausweglosen Situationen zu erlauben, so dass der Roboter sich befreien kann, sowie um im späteren Verlauf der Mission, wenn die wichtigsten Missionsziele bereits erfüllt sind, zusätzlichen Entscheidungsspielraum zu erhalten. Insgesamt wird das entwickelte Risikobewusste System gleichzeitig zu einer erheblichen Steigerung in der Roboterautonomie und in der Ausfallsicherheit führen.

## 1. EINLEITUNG

Missionen im Weltraum nutzen hochkomplexe Systeme unter extremen Umweltbedingungen. Die verschiedenen Systemkomponenten und damit die Mission als Ganzes sind somit erheblichen Risiken ausgesetzt. Robotermissionen, wie sie gerade im Kontext planetarer Exploration z.B. in den verschiedenen Marsmissionen eingesetzt werden ([1] [2] [3]), sind der zusätzlichen Schwierigkeit ausgesetzt, dass durch die hohe Entfernung zur Basisstation auf der Erde eine lange Kommunikationsverzögerung entsteht. Dies erschwert das korrektive Eingreifen zur Laufzeit oder gar die direkte Steuerung per Teleoperation stark, beziehungsweise macht sie schlicht unmöglich.

In den aktuellen Missionen wird diese Steuerungsproblematik dadurch gelöst, dass von menschlichen Expertenteams hoch detaillierte Pläne für die Handlungen eines Roboters an einem Mars-Tag (Sol) entwickelt werden. Diese werden dann zu Beginn des Tages in einer Kommunikationsphase übertragen, woraufhin der Roboter sie ohne weiteren Eingriff umsetzt. Abschließend übermittelt der Roboter die verschiedenen Aufzeichnungen und gesammelten Sensordaten des Tages, worauf basierend in der Mars-Nacht der nächste Plan entwickelt wird. Die getroffenen Entscheidungen sind dabei in der Regel möglichst sicher und konservativ, um

jegliche Schäden zu vermeiden.

Diese Vorgehensweise hat gute Erfolge erzielt und dafür gesorgt, dass alle bisherigen Mars-Missionen weit über ihren angesetzten Missionszeitraum hinweg fortschreiten konnten. Sie hat jedoch einige nennenswerte Nachteile, insbesondere mit Blick auf zukünftig immer komplexere Systeme und langfristig zunehmender Distanz bei planetaren Explorationsmissionen, wodurch ein stärkerer Ausbau des Autonomiegrades der Roboter sinnvoll ist.

Zunächst ist der hohe kontinuierliche Aufwands- und Kostenfaktor durch die nächtlichen Planungsphasen zu nennen. Mit effektiven Missionszeiten von mehreren Jahren stellt die langfristige Bindung hochqualifizierter Ingenieure und Wissenschaftler an die explizite Tagesplanung von Missionen einen limitierenden Faktor für die Entwicklung und Durchführung weiterer Missionen dar. Entscheidender jedoch ist die Beobachtung, dass die Planung durch autonomere Systeme einfach zu vermeidende Fehler erzeugen kann. Dies ließ sich beispielsweise an Sol 446 der Mission des Rovers Opportunity beobachten, als dieser mit dem erhaltenen Auftrag vorwärts zu fahren sich tief in den „Purgatory“ getauften Sandhaufen eingrub und über einen langen Zeitraum mühsam befreit werden musste ([4]). Eine einfache Fehleinschätzung bezüglich der nicht völlig bekannten Bodenbeschaffenheit hatte so schwerwiegende Folgen, die sich durch ein

dynamischeres System leicht hätten vermeiden lassen können.

Während einige grundlegende Entscheidungen inzwischen auf Seiten der Mars-Rover autonom getroffen werden (s. 2.1), bleibt man momentan noch sowohl hinter den technischen Möglichkeiten der Rover als auch aktuellen Techniken im Bereich der autonomen Exploration und Planung zurück. Ein primärer Faktor hierfür ist die fehlende Möglichkeit der Wartung und Reparatur bei entstehenden Schäden. Das Risiko durch autonom getroffene Entscheidungen für den Roboter und damit die Mission als Ganzes lässt sich schwer einschätzen.

Um in diesem Kontext dennoch Autonomie zu ermöglichen, soll ein Risikobewusstsein auf Roboterebene entwickelt werden. Eine präzise Risikoeinschätzung des Roboters bezüglich seiner Situation und geplanter Aktionen erlaubt es auch ohne den kontinuierlichen Eingriff von menschlichen Experten sichere Entscheidungen treffen zu können. Zusätzlich kann damit der grundsätzliche Drang zu stark konservativen Aktionen vermieden werden, da die sichersten und vorsichtigsten Optionen nur dann gewählt werden müssen, wenn ein tatsächliches Risiko gegeben ist.

## 2. HINTERGRUND

### 2.1. Autonome Entscheidungen aus visueller Odometrie

Die prinzipiell möglichen autonomen Fähigkeiten der Mars-Rover wurden bisher wenig eingesetzt. Gerade unter Einsatz der Fähigkeit der visuellen Odometrie haben sich jedoch bereits in zwei Anwendungsfällen autonome Vorgehensweisen als wichtig herausgestellt. Die damit erzeugten Ergebnisse sind präziser und sicherer als durch die Ausführung eines strikt vorgegebenen Planes. Diese haben sich in ihrer Bedeutung im Verlauf der Missionen zu „kritischen Systemen für die Sicherheit der Fahrzeuge“ ([5]) entwickelt.

Das Anfahren bestimmter Zielpositionen, beispielsweise um gefundene Felsen oder andere interessante Objekte zu analysieren, ist je nach Bodensituation schwer rein geplant möglich. Ein unvorhergesehenes Abrutschen des Roboters, wie es gerade bei dem auf dem Mars existierenden Sand in Kombination mit Steigung nicht zu vermeiden ist, verhindert ein Erreichen des Zielpunktes und kann unter Umständen die Route sogar in gefährlichere Bodenbereiche ableiten. Um dem entgegen zu wirken wurde die Fähigkeit des eigenständigen Anfahrens vorgegebener Punkte eingesetzt. Unvorhergesehene Fehler können so vermieden werden, wodurch Zeit für Korrektur über Folgetage gespart wird.

Ein weiterer Einsatzzweck für die visuelle Odometrie ist die Detektion von Abweichungen der aktuellen Situation gegenüber dem gegebenen Plan. Der in 1 beschriebene „Purgatory“ Vorfall hat gezeigt, wie das strikte Befolgen vorgegebener Aktionen aktiv die Mission gefährden kann. Um weitere Probleme dieser Art zu vermeiden wurde visuelle Odometrie eingesetzt um die tatsächliche Veränderung der Position des Rovers zu bestimmen.

Diese kann daraufhin mit der laut Plan vorgegebenen Positionsveränderung verglichen werden. Diskrepanzen zwischen diesen Werten zeigen, dass der Plan nicht korrekt befolgt wird und ein Fall wie das aktive Eingraben durch den Roboter oder ein Abrutschen vorliegt. In diesen Fällen kann dann die Planausführung unterbrochen werden um eine aktive Verschlechterung der Situation zu vermeiden.

In beiden genannten Beispielen sind die eigentlich autonom getroffenen Entscheidungen relativ simpel und vorsichtig (wie das schlichte Abbrechen der Aktionen). Es lässt sich aber erkennen, wie wichtig das intelligente Eingreifen des Roboters in die Planausführung basierend auf einem elementaren Verständnis des eigenen Zustands ist. Komplexere Ansätze können hier sowohl die gewonnene Sicherheit als auch durch subtileres Eingreifen als den kompletten Abbruch die effektive Arbeitszeit des Roboters stark erhöhen.

### 2.2. Planungsansätze für Mars-Roboter

Sowohl für das Entwerfen von Plänen als auch für das eigenständige Planen durch den Roboter sind Frameworks vonnöten, um die möglichen Aktionen und ihre Abfolge zu modellieren. Die CLARATy Architektur ([6]) bietet einen zweischichtigen, modularen Ansatz in dem die Fähigkeiten des Systems feingliedrig in einer Functional Layer gesammelt sind. Diese wird dann von einer Decision Layer, die die extern gegebene Planung und die lokale Planung und Ausführung durch den Roboter eng koppelt, verwendet um verschiedene Ziele umsetzen zu können.

Das OASIS System ([7]) geht weiter, indem zur Ausführung nötig werdende Umstrukturierungen des Planes möglich werden. Wird durch eine veränderte Situation, wie beispielsweise unerwartet hoher Verbrauch von Ressourcen (z.B. Energie), eine Aktualisierung des Planes nötig, so werden die verschiedenen Aktionen bezüglich ihrer wissenschaftlichen Priorität analysiert. Darauf basierend kann dann beim Anpassen des Planes sichergestellt werden, dass wenn Bestimmte Teilaufgaben aufgegeben werden müssen, die wissenschaftlich bedeutendsten Ziele dennoch erreicht werden können.

Ein spezifischeres Planungssystem ist in ([8]) vorgestellt. Es werden verschiedene Bodenarten erkannt und bezüglich ihrer Gefahr für den Roboter kategorisiert. Darauf basierend wird dann eine Pfadplanung durchgeführt, wobei bestimmte Bodentypen die ein zu großes Risiko darstellen vermieden werden können.

OASIS erlaubt bereits nutzt bereits eine elementare Kosten-Nutzen-Abschätzung vom Standpunkt des wissenschaftlichen Gewinns aus. Die mit Aktionen verbundenen Kosten oder Risiken sind über den zu erwartenden Ressourcenverbrauch allerdings sehr grundlegend. Hier kann eine komplexere Einschätzung des eigenen Zustands und der erwarteten Veränderungen davon deutlich detailliertere Entscheidungen ermöglichen.

### 2.3. Zustandsüberwachung

Die verschiedenen Systeme in den bisherigen Mars-Missionen wurden von dedizierten Sicherheitssystemen

streng überwacht, um frühzeitig Fehler erkennen und beheben zu können ([9][10]). Diese basieren auf zahlreichen Monitoren, die explizit bestimmte Komponenten überwachen und auf auffälliges Verhalten untersuchen. Fehler werden dabei zeitgestempelt gespeichert und übermittelt, sodass in einer Verkettung von Fehlern die ursprüngliche Ursache erkannt werden kann. Eine feingliedrigere Bewertung von auftretenden Risiken wurde dabei allerdings nicht umgesetzt und auch eine Prädiktion von Fehlern ist durch dieses System nur sehr bedingt möglich. Derartige Ansätze zur Analyse des Systemzustandes sind deshalb nicht geeignet, um risikobewusste Entscheidungen treffen zu können.

### 3. KONZEPT

Im Folgenden wird ein Konzept vorgestellt, das es einem Roboter ermöglicht, vor Ort risikobewusste Entscheidungen treffen zu können. Dieses besteht primär aus zwei grundlegenden Komponenten. Zum einen, aus einer detaillierten Zustandsüberwachung in Kombination mit der Einschätzung interner Gefahren und einer Modellierung der verschiedenen Fähigkeiten des Roboters. Dies wird hier unter dem Begriff Selbstbewusstsein zusammengefasst, da es insgesamt dem Roboter ermöglicht, sich seines Zustands, seiner Fähigkeiten und des Einflusses seiner Aktionen auf sich selbst bewusst zu sein und er somit ein detailliertes Konzept von seinem Selbst erhält. Zum anderen wird ein Bewusstsein für die Umgebung des Roboters geschaffen. Dabei werden verschiedene Gefahren erkannt und kategorisiert, wobei eine Fusion dieser Gefahren die Bestimmung des Risikofaktors der Umgebung als Ganzes erlaubt. Insgesamt ist so eine Risikoeinschätzung der Gesamtsituation möglich. Darauf basierend können dann verschiedene Techniken angewendet werden, um risikobewusst Planen und Entscheidungen treffen zu können (s. BILD 1).

## 4. SELBSTBEWUSSTSEIN

### 4.1. Grundlagen

Das Ziel des entwickelten Selbstbewusstseins ist ein

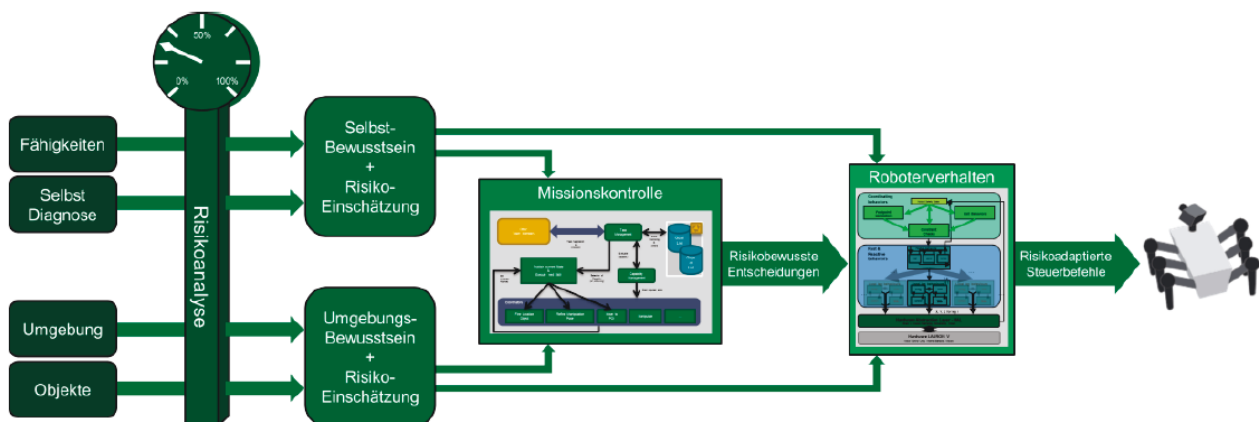


BILD 1. Schematische Darstellung des Grund-Konzepts: Selbstbewusstsein und Umgebungsbewusstsein werden kombiniert, um der Missionskontrolle das Treffen von risikobewussten Entscheidungen zu ermöglichen, woraufhin das Verhalten des Roboters an die gegebene Risikosituation adaptiert wird.

Verständnis für die Risiken, denen der Roboter ausgesetzt ist. Ein Risiko lässt sich dabei als eine negative Folge beschreiben, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten kann.

Diese negativen Folgen sind dabei in den Wirtschaftswissenschaften, wo Risikoanalysen primär untersucht werden, in der Regel der Verlust von Geld oder Anlagen. Diese Betrachtungsweise ist allerdings gerade im Bereich der Weltraumrobotik ungeeignet, da eine Reparatur oder Ersetzung von Teilen nicht möglich ist – der finanzielle Wert einer beschädigten Komponente ist somit irrelevant. Stattdessen ist die entscheidende zu betrachtende Größe, wie stark die Einsatzfähigkeit des Roboters durch einen Schaden eingeschränkt wird. Risiko ist hier also charakterisiert durch eine mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintretenden Verringerung der Einsatzfähigkeit des Roboters.

Um diese Veränderung der Einsatzfähigkeit eines Roboters vorhersagen zu können ist es notwendig zu betrachten, was die möglichen Ursachen für solche Veränderungen sind. Dabei wird unterschieden zwischen Risikoquellen im Umfeld des Roboters, die in 5 als externe Gefahren beschrieben werden, und den direkten Veränderungen am Roboter selbst, die seine Einsatzfähigkeit einschränken können. Diese werden als interne Gefahren im Folgenden beschrieben.

### 4.2. Interne Gefahren

Im Laufe einer Mission treten an einem Roboter verschiedene Schäden und Abnutzungserscheinungen auf. Diese können die Fähigkeit des Roboters, bestimmte Aktionen auszuführen, auf verschiedene Art und Weise beeinflussen. Um diese Veränderungen jedoch messen zu können, und so tatsächlich Einschätzungen zum aktuellen Zustand des Roboters treffen zu können, sind unterschiedlichste Techniken und Sensoren notwendig.

Die Verringerung der Leistungsfähigkeit eines Motors kann so beispielsweise oft direkt aus einer Veränderung in seinem Energieverbrauch erkannt werden. Schäden an Starrkörperkomponenten des Roboters wie ein Verbiegen eines Beinsegmentes eines Laufroboters oder Schäden an den metallenen Rädern eines Rovers müssen aber entweder indirekt durch ihren Effekt auf die entstehenden

und messbaren Kräfte am Roboter, mit zusätzliche Sensorik wie integrierte Dehnmessstreifen oder durch expliziter Analysevorgänge wie die Ausführung von Testroutinen oder der Betrachtung mit einer Kamera gemessen werden.

Die verschiedenen zu erwartenden Fehlerquellen und Möglichkeiten zur Messungen dieser wurden deshalb detailliert analysiert. Zunächst wurden alle in Explorationsrobotern zu erwartenden grundlegenden Komponententypen gesammelt. Für diese wurde dann basierend auf HAZOP ([11]) eine strukturierte Analyse aller vorherzusehenden Abweichungen vom Zielverhalten oder des korrekten Zustands durchgeführt (TAB 1).

	<i>kein/nicht</i>	<i>teilweise</i>	<i>zusätzlich</i>	<i>invers</i>
<i>Antriebs-einheit</i>	Freilauf	Präzisions-verlust	Reibung	Blockade
<i>Starr-körper</i>	Bruch	Verfor-mung	Steifigkeits-änderung	-
<i>Kabel</i>	Kabelbruch	Wackel-kontakt	Induktion	Kurz-schluss

TAB 1. Auszug aus HAZOP-basierter Fehlerquellen-Analyse: basierend auf Leitworten werden alle Systemkomponenten auf mögliche Fehlverhalten untersucht

Im nächsten Schritt wurde daraufhin untersucht, welche Sensorarten geeignet sind, um die gefundenen möglichen Fehler messbar zu machen. Es wurde dabei explizit priorisiert, die verschiedenen Komponententypen und Sensoren generisch zu betrachten, um eine roboterunabhängige Analyse sicherzustellen. Die Ergebnisse davon sind in BILD 5 gesammelt. Besonders erwähnt sei hierbei der Begriff der virtuellen Sensoren, worunter verschiedene Softwaretechniken zur Überwachung des Zustands und Verhaltens zusammengefasst sind, wie sie beispielsweise in 2.3

beschrieben wurden und bereits vielseitig eingesetzt werden.

Die durchgeführte Analyse ist nun in zweierlei Hinsicht bedeutend. Zum einen dient sie als Grundlage, um im weiteren Verlauf des Projekts risikobewusste Modellierung verschiedener Komponenten zu ermöglichen, da nun die gesammelten Sensortechniken explizit genutzt werden können um eine feingliedrige Zustandsanalyse zur Laufzeit durchzuführen. Zum anderen dient sie als Grundlage für die Entwicklung von Robotern, die explizit mit Hinsicht auf ein detailliertes Selbstbewusstsein entworfen werden sollen. Sie kann dabei als Anleitung dienen, welche Sensoren zusätzlich in Betracht gezogen werden sollten, um mit sonst gegebenen Möglichkeiten schwer oder nicht messbare Komponenten überwachen zu können.

## 5. UMGEBUNGSBEWUSSTSEIN

### 5.1. Externe Gefahren

Die Umgebung eines Roboters stellt, insbesondere durch ihre verglichen mit internen Gefahren deutlich höhere Unbekanntheit, eine große Risikoquelle dar. Die in 1 beschriebene Vorgehensweise bei der Aktionsplanung bisheriger Mars-Rover hat zu einem primären Ziel, eine möglichst sichere Interaktion mit der Umwelt zu ermöglichen. Dennoch entstehen von feststehenden Robotern bis hin zu physischen Radschäden durch das Überfahren von Steinen immer wieder verschiedene Schäden. Für ein echtes Verständnis für die einzugehenden Risiken eines Roboters ist deshalb eine umfassende Sammlung der Gefahren in seiner Umwelt notwendig.

Grundsätzlich lassen sich die externen Gefahren in drei Gruppen unterteilen: natürliche, anthropogene und aus Interaktion resultierende. Während natürliche Gefahren für das betrachtete Szenario der planetaren Exploration bei weitem die bedeutendste Kategorie darstellen, sind die anderen Gruppen gerade mit Hinblick auf eventuellen stärkeren Ausbau von Missionen oder für die Übertragung des Risikobewusstseins auf andere Anwendungsfelder notwendig und werden deshalb hier ebenfalls betrachtet.

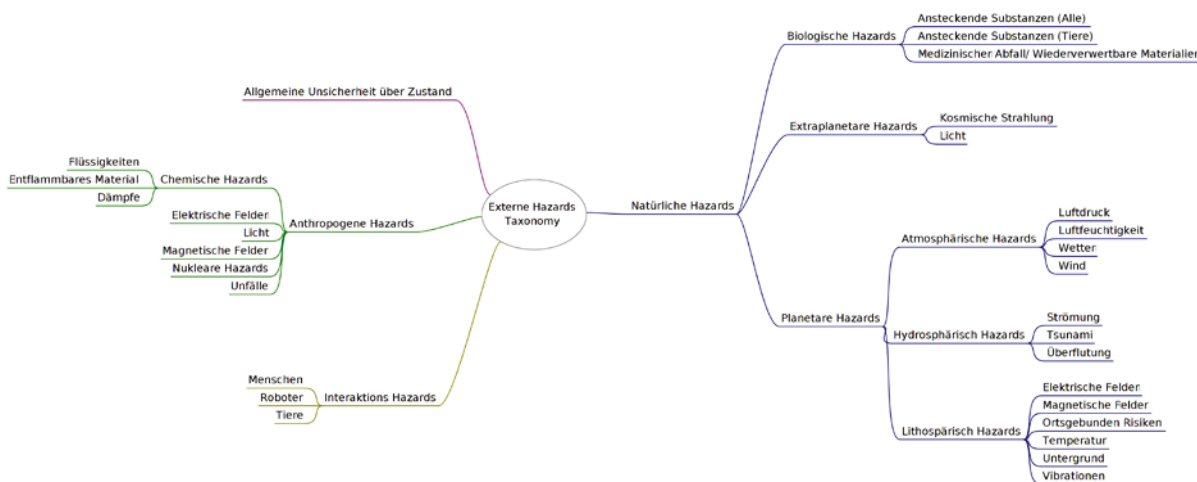


BILD 2. Taxonomie aller externen Gefahren

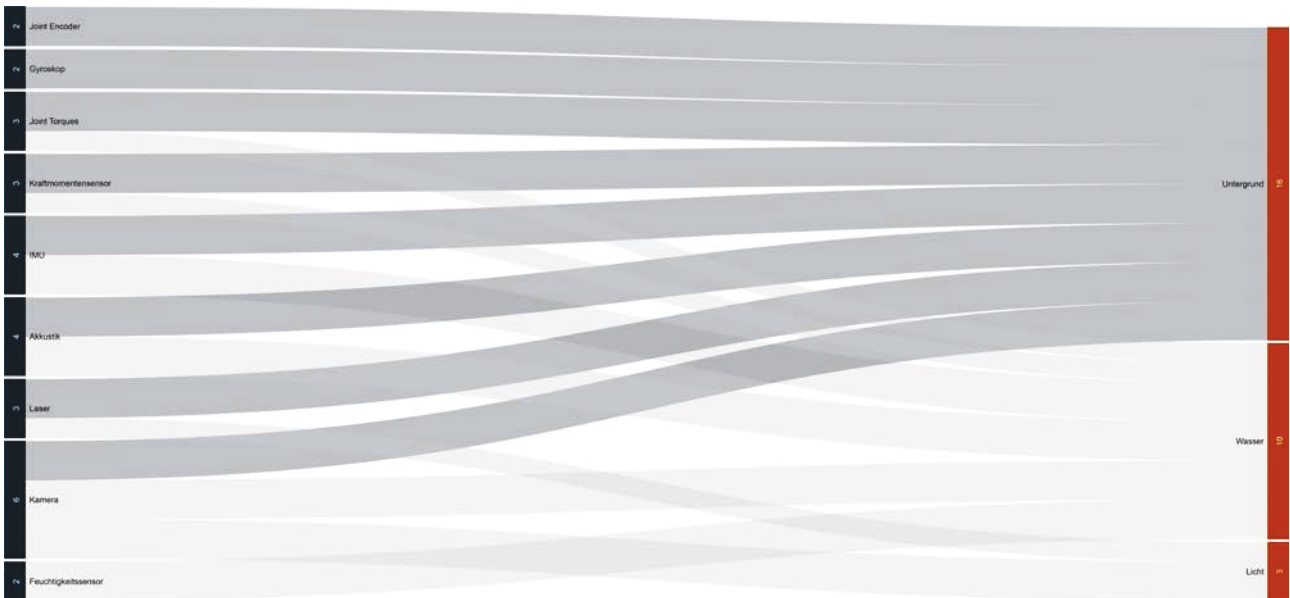


BILD 4. Auszug aus Sankey-Graph zu externen Gefahren: Für jeden Sensor wird analysiert, wie geeignet er ist, um verschiedene Gefahren zu analysieren – beispielsweise können verschiedene Sensoren genutzt werden, um die Bodenbeschaffenheit zu untersuchen, während nur die Kamera und bedingt der Laser-Sensor eingesetzt werden können, um Aussagen über die Lichtverhältnisse zu treffen.

All diese Gefahrenkategorien lassen sich weiter aufgliedern, sodass sich insgesamt eine Taxonomie über alle zu erwartenden Arten von Gefahren aufstellen lässt (BILD 2). Hervorzuheben ist hierbei die Einführung der Unsicherheit als zusätzliche Risikokategorie. Dadurch wird abgebildet, dass durch lokal verschiedene Güte der Messungen Bereiche niedriger und hoher Unsicherheit entstehen können und unbekanntere Gebiete so mit einer zusätzlichen, aus dem Unwissen resultierenden Gefahr versehen werden können.

Den nächsten Schritt stellt auch hier die Frage dar, wie all diese Gefahren erkannt und gemessen werden können. Es wurde deshalb erneut eine Analyse durchgeführt, welche Sensoren zur Erkennung der verschiedenen Gefahrentypen geeignet sind. Ein Auszug des Ergebnisses ist in BILD 3 zu finden, während der vollständige die vollständige Sammlung in BILD 6 gegeben ist. Erneut soll dies sowohl als Grundlage zur Modellierung der Erkennungssysteme dienen, als auch zur Hilfe bei Entwurfsentscheidungen für Roboter, da einfach überprüft werden kann ob mit gegebener Sensorik bestimmte Arten von Gefahren erkannt werden können oder ob weitere Sensoren nötig wären, wenn der Gefahrentyp für den Roboter im Speziellen als relevant genug angesehen wird.

**5.2. Gefahrenkarte**

Aus den verschiedenen gefundenen Gefahren kann nun eine Karte erzeugt werden, um ein Gesamtverständnis für das Risiko der Umgebung zu entwickeln. Dabei ist zu sagen, dass in einigen Fällen nah beieinanderliegende Hindernisse in ihrem Gefahrenpotential über denen der einzelnen Objekte liegen. Beispielsweise kann ein Fels als Gefahr gesehen werden, ist dieser aber zusätzlich an oder auf Sandboden, der das Abrutschen fördert, so ist sowohl der Bodenbereich als auch der Fels selber als gefährlicher zu sehen. Dies kann abgebildet werden, indem die Karte nach dem Prinzip eines Potentialfeldes aufgefasst wird, wodurch eine automatische

distanzbasierte Aggregation erfolgt.

Die verschiedenen Gefahren in der Umgebung wurden bisher roboterunabhängig betrachtet, es ist jedoch offensichtlich, dass für verschiedene Robotertypen bestimmte Gefahrentypen unterschiedlich gewichtet werden müssen. Für einen fliegenden Roboter ist so beispielsweise die Beschaffenheit des Bodens nahezu irrelevant, wohingegen die Windverhältnisse deutlich stärkere Auswirkungen haben können, als für bodenbasierte Alternativen. Um dennoch eine roboterunabhängige Aggregation von Gefahren zu einer Karte ermöglichen zu können, werden verschiedene Typen von Risiken basierend auf der entwickelten Gefahrentaxonomie in verschiedenen Schichten gesammelt. So kann im beschriebenen Beispiel die

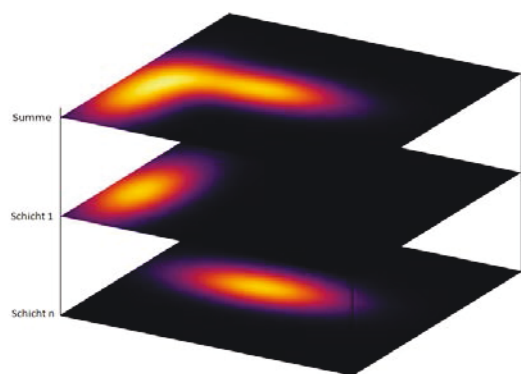


BILD 3. Schematische Darstellung einer Gefahrenkarte: Verschiedene Gefahrentypen werden in separaten Schichten aggregiert. Diese können dann entweder roboterunabhängig aufsummiert werden oder roboterspezifisch gewichtet werden.

gleiche grundlegende Kartenstruktur für beide Robotertypen verwendet werden, die Gewichtung der jeweiligen Kartenschichten für boden- und windbasierte Gefahren fällt jedoch für die beiden Roboter unterschiedlich aus. Beispielhaft ist dieses Prinzip in BILD 4 dargestellt.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde ein Konzept für ein Risikobewusstsein für Roboter dargestellt. Dies soll es erlauben, auch in komplexen und riskanten Situationen wie den Szenarien der planetaren Exploration stärker autonom arbeitende Roboter zu ermöglichen und gleichzeitig die Effizienz und Sicherheit dieser zu erhöhen.

Es wurde dafür das Prinzip eines Selbstbewusstseins entworfen, dass auf der detaillierten Untersuchung des eigenen Zustands und eines feinen Verständnisses der Funktionalität der einzelnen Komponenten des Systems basiert. Für dieses wurden strukturierte Analysen durchgeführt um alle zu erwartenden Fehlverhalten von elementaren Komponenten des Systems zu sammeln und Messmethoden und Sensoren auszuwählen, um diese präzise erkennen zu können. Im weiteren Verlauf des Projektes werden diese Konzepte umgesetzt und evaluiert werden.

Zusätzlich wurde eine umfassende Untersuchung der verschiedenen möglichen Gefahren durch die Umgebung durchgeführt. Diese wurden kategorisiert und auf ihre Erkennbarkeit mit verschiedenen Sensoren untersucht. Für die Erstellung eines roboterunabhängigen Gesamtverständnisses der Umgebung wurde das Prinzip einer mehrschichtigen, auf einem Potentialfeld basierenden Gefahrenkarte entworfen. In zukünftigen Arbeiten werden die ausgewählten Sensoren für die automatische Erkennung und Eintragung in eine Karte eingesetzt.

Insgesamt kann das entwickelte Konzept verschieden eingesetzt werden. Es kann eine unterstützende Funktion für Operatoren von Robotersystem bereitstellen, der somit durch die Risikobewertung des Roboters fundierte Entscheidungen treffen und kalkulierte Risiken eingehen kann. Ebenso ist es möglich, dass das Risikobewusstsein des Roboters eingesetzt werden kann, um als zu riskant angesehene Pläne zu blockieren und den Operatoren zu melden oder lokal gefundene weniger riskante Alternativen auszuwählen. Zuletzt soll das Risikobewusstsein auch als Grundlage für eine autonome Explorationsstrategie dienen. Der Roboter kann dabei selbst Entscheidungen treffen, die unter Berücksichtigung der gegebenen Risiken zu bestimmten wissenschaftlichen Zielen führen. Dabei kann für besonders wichtige Ziele ein entsprechend kalkuliertes Risiko eingegangen werden, während weniger bedeutende Aufgaben mit entsprechend hoher Sicherheit und geringer Risikobereitschaft ausgeführt werden. Zusätzlich kann über einen längeren Missionszeitraum die Risikobereitschaft erhöht werden, sodass zunächst mehr Wert auf Sicherheit gelegt wird, um die grundlegenden Missionsziele garantiert erreichen zu können, später aber ohne das Eingehen größerer Risiken nicht mögliche Ziele umgesetzt werden können. Der Roboter kann so sein Risikoverständnis einsetzen, um dynamisch den wissenschaftlichen Gewinn aus seiner

Mission zu maximieren.

## 7. DANKSAGUNG

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des intelliRISK Projekts durchgeführt und von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50RA1730 gefördert, wofür sich die Autoren ausdrücklich bedanken.

## 8. LITERATUR

- [1] Mishkin, Andrew H., et al. "Experiences with operations and autonomy of the mars pathfinder microver." *Aerospace Conference, 1998 IEEE*. Vol. 2. IEEE, 1998.
- [2] Biesiadecki, Jeffrey J., et al. "Mars exploration rover surface operations: Driving opportunity at meridiani planum." *IEEE robotics & automation magazine* 13.2 (2006): 63-71.
- [3] Grotzinger, John P., et al. "Mars Science Laboratory mission and science investigation." *Space science reviews* 170.1-4 (2012): 5-56.
- [4] Squyres, Steven W., et al. "Overview of the opportunity mars exploration rover mission to meridiani planum: Eagle crater to purgatory ripple." *Journal of Geophysical Research: Planets* 111.E12 (2006).
- [5] Maimone, Mark, Yang Cheng, and Larry Matthies. "Two years of visual odometry on the mars exploration rovers." *Journal of Field Robotics* 24.3 (2007): 169-186.
- [6] Volpe, Richard, et al. "The CLARAty architecture for robotic autonomy." *Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings..* Vol. 1. IEEE, 2001.
- [7] Estlin, Tara, et al. "Increased Mars rover autonomy using AI planning, scheduling and execution." *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. IEEE, 2007.
- [8] Ono, Masahiro, et al. "Risk-aware planetary rover operation: Autonomous terrain classification and path planning." *Aerospace Conference, 2015 IEEE*. IEEE, 2015.
- [9] Neilson, Tracy. "Mars exploration rovers surface fault protection." *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2005.
- [10] Benowitz, Ed. "The Curiosity Mars Rover's Fault Protection Engine." *Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014.
- [11] Redmill, Felix, Morris Chudleigh, and James Catmur. *System safety: HAZOP and software HAZOP*. Chichester: Wiley, 1999.

## 9. ANHANG

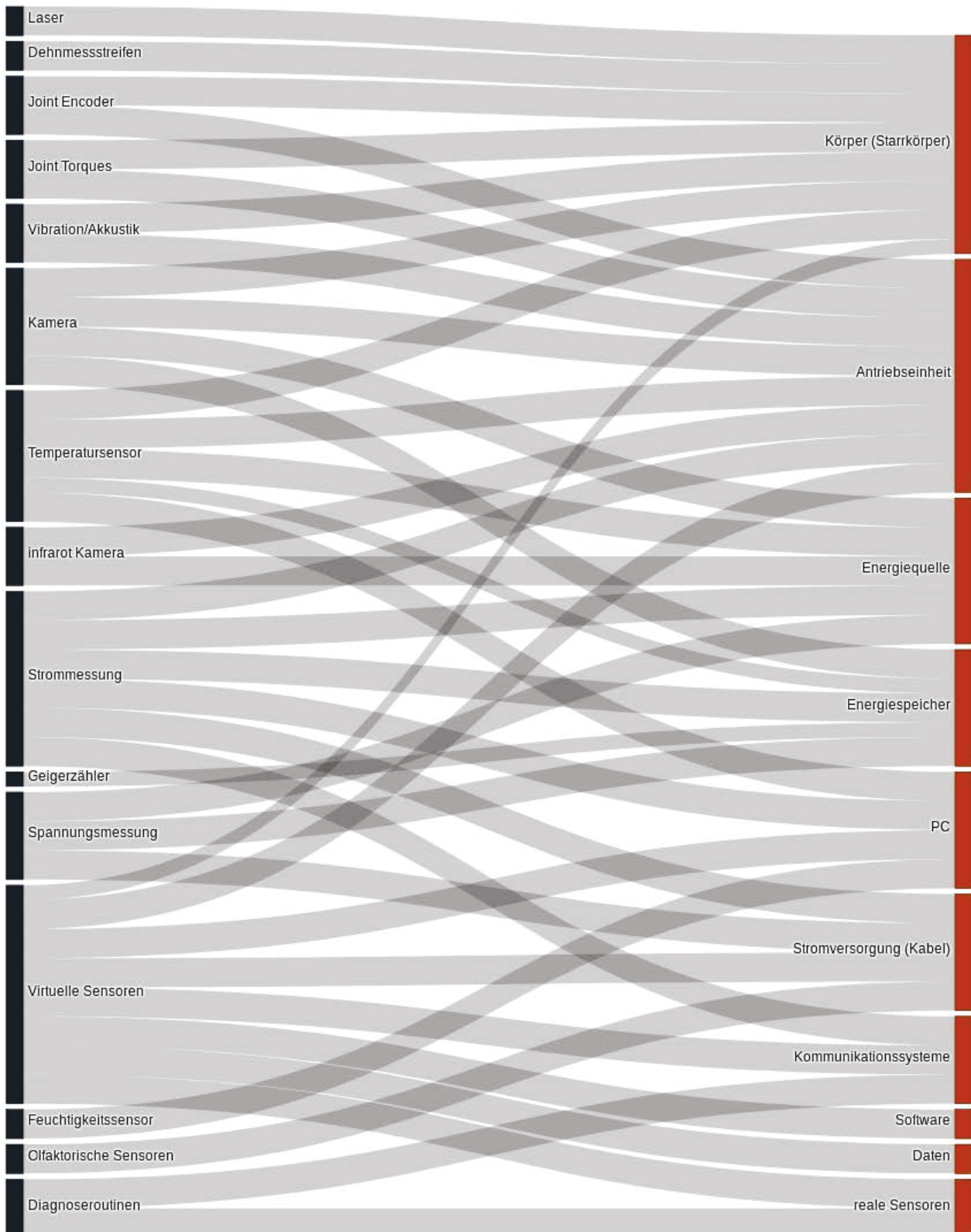


BILD 5. Sankey-Graph zu internen Gefahren: Für jeden Komponententyp eines Roboters wird untersucht, welche Sensoren geeignet sind, um diesen zu untersuchen. Dabei lässt sich erkennen, welche Sensorik nur hochspezialisiert eingesetzt werden kann und welche flexibel genutzt werden kann um verschiedenste interne Gefahren zu erkennen.

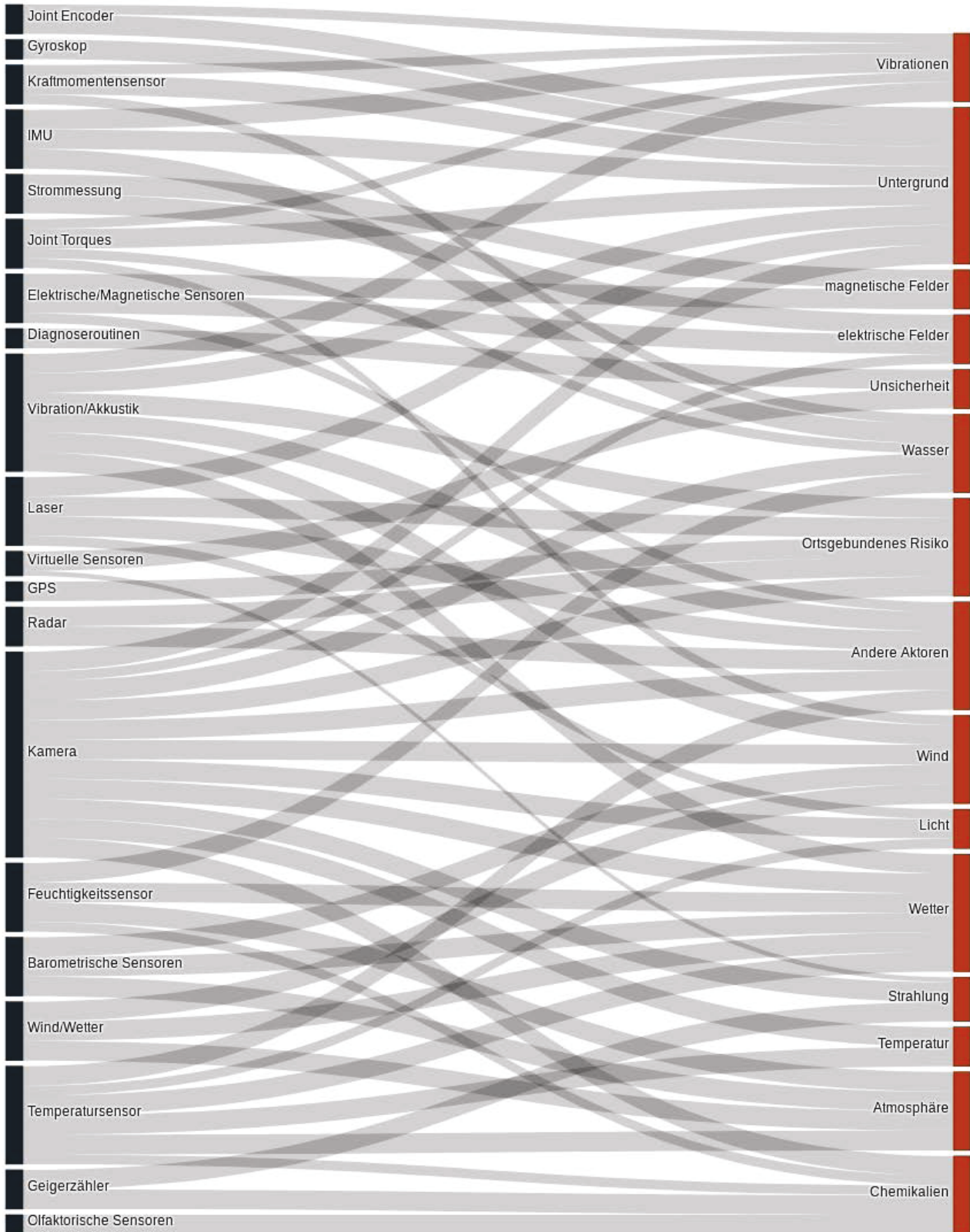


BILD 6. Sankey Graph zu externen Gefahren