

Eine System of Systems Analyse
drohnen- und satellitengestützter Inspektionsverfahren
für ausgedehnte Netzinfrastrukturen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Johannes Alexander Müller

aus
Gunzenhausen

2026

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick

Zweitgutachter: Prof. Dr. Christoph Ihl

Tag der mündlichen Prüfung: 26.01.2026

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht die techno-ökonomische Eignung von drohnen- und satellitengestützten Fernerkundungsverfahren zur Inspektion ausgedehnter Netzinfrastrukturen wie Stromnetze, Gaspipelines und Bahnstrecken. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur System-of-Systems-Konzeptionierung, die verschiedene Sensorträgerplattformen hinsichtlich ihrer Effizienz und Wirtschaftlichkeit vergleicht, mit besonderem Fokus auf unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) und Satelliten.

Die Arbeit beginnt mit einer Analyse der Inspektionsanforderungen dieser Infrastrukturen, einschließlich der benötigten Datenqualität und -häufigkeit. Anschließend werden die Grundlagen der Fernerkundungssensorik (z. B. LIDAR, RADAR, Infrarot) sowie die Eigenschaften von Drohnen (Starrflügel, VTOL, Multikopter) und Satelliten erläutert. Ein zentraler Bestandteil ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Routenoptimierung und eines Kostenmodells, das Faktoren wie Befliegungshäufigkeit und damit einhergehender Auslastung, Reichweite, Betriebsbasen und Fixkosten berücksichtigt.

Die Methodik wird an zwei Fallstudien angewendet: dem deutschen Bahnnetz und dem US-amerikanischen Erdgasfernleitungsnetz. Für das Bahnnetz zeigt sich, dass hochautomatisierte VTOL-Drohnen die kosteneffizienteste Lösung bieten, sofern mit dieser Konfiguration eine hinreichend große Reichweite erzielt werden kann. Bei der Befliegung des wesentlich größeren Gebietes des US-amerikanischen Pipelinesystems können hochautomatisierte Starrflügel-UAVs etwaige Reichweitevorteile leichter ausspielen, da die Anforderungen an eine effiziente Routenplanung hier höher liegen. Satelliten sind in beiden Fällen vor allem bei niedrigen Auflösungsanforderungen wirtschaftlich konkurrenzfähig gegenüber Drohnensystemen mit begrenzten Reichweitenfähigkeiten. Herausgearbeitet wird dabei insbesondere der wirtschaftliche Mehrwert inkrementeller Reichweite im Flugzeugentwurf von Drohnen innerhalb eines bestimmten Reichweitenpektrums.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Drohnensysteme durch Automatisierung und Skalierbarkeit traditionelle Inspektionsmethoden (z. B. Helikopter) übertreffen können, wobei die Wahl der Plattform stark von der Infrastruktur und den spezifischen Anforderungen abhängt. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion alternativer Ansätze und einem Ausblick auf zukünftige Forschung, insbesondere zur Reichweitensteigerung von UAVs und deren Integration in hybride Systeme mit Satelliten.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
1 Problemstellung	1
1.1 Bedeutung der Ferninspektion bei ausgedehnten Infrastrukturen . . .	1
1.2 Infrastrukturspezifische Auswahl eines geeigneten Fernerkundungs- systems	7
1.3 Einordnung von satellitengestützten gegenüber luftgestützten Fer- nerkundungssystemen	9
1.4 Zielsetzung der Arbeit	10
1.5 Aufbau der Arbeit	11
2 Grundlagen drohnen- und satellitengestützter Fernerkundung	13
2.1 Fernerkundungssensorik	14
2.1.1 Radio-, Mikrowellen, Synthetic Aperture Radar	16
2.1.2 Infrarot (IR)	17
2.1.3 Sichtbares Spektrum	17
2.1.4 Gamma-, Röntgen- und Ultraviolette Strahlung	18
2.1.5 Laser Detection and Ranging (LIDAR) und Differential Ab- sorption LIDAR (DIAL)	19
2.1.6 Hyperspektral- vs. Multiband-Bildgebung	20
2.2 Fernerkundung durch (unbemannte) Luftfahrzeuge	23
2.3 Fernerkundung durch Erdbeobachtungssatelliten	30
2.4 Zusammenfassung	36
3 Energieinfrastrukturen und Inspektionsanforderungen	39
3.1 Stromnetze	39
3.1.1 Infrastrukturtopologie	39
3.1.2 Inspektionsanforderungen und Anwendbarkeit von UAVs und Satelliten	43
3.2 Gaspipelines	48
3.2.1 Infrastrukturtopologie	48
3.2.2 Inspektionsanforderungen und Anwendbarkeit von UAVs und Satelliten	51
3.3 Bahnstrecken und Oberleitungen	55
3.3.1 Infrastrukturtopologie	55

3.3.2	Inspektionsanforderungen und Anwendbarkeit von UAVs und Satelliten	57
3.4	Zusammenfassung	61
4	Methodik einer System-of-Systems Konzeptionierung für Drohnenbefliegung	63
4.1	Algorithmen der Routenführung und Missionssimulation	64
4.1.1	Literatur verfügbarer Algorithmen	64
4.1.2	Aufbau verwendeter Algorithmen	66
4.2	Kostenmodell für Drohnen System-of-Systems	72
4.2.1	Starrflügel UAV - teilautomatisierter Betrieb	74
4.2.2	Starrflügel UAV - hochautomatisierter Betrieb	77
4.2.3	VTOL UAV - hochautomatisierter Betrieb	80
5	Vergleichende Systemanalyse für ausgewählte Infrastrukturen	85
5.1	Bahnstrecken und Oberleitungen - Deutschland	85
5.1.1	Payloadauslegung	85
5.1.2	Routenoptimierung	88
5.1.3	Kostenoptimierung	93
5.1.4	Vergleichende Systembewertung	116
5.2	Erdgas Fernleitungen USA	123
5.2.1	Routenoptimierung	123
5.2.2	Kostenoptimierung	128
5.2.3	Vergleichende Systembewertung	143
6	Diskussion alternativer Fernerkundungsansätze und deren Rolle in Energiesystemen	151
6.1	Wert von Reichweitensteigerung bei UAVs	152
6.2	UAV Systemkonzepte im Vergleich	153
6.3	Vergleich zu Satellitensystemen	154
6.4	Einschränkungen und Limitationen des Forschungsansatzes	156
7	Zusammenfassung und Ausblick	159
	Abbildungen	161
	Tabellen	169
	Literaturverzeichnis	171
	Lebenslauf	181

Nomenklatur

Akronyme

1. Problemstellung

1.1 Bedeutung der Ferninspektion bei ausgedehnten Infrastrukturen

Moderne Gesellschaften stützen sich auf zentrale Infrastrukturen, welche notwendige Voraussetzung für das Funktionieren der Hauptsektoren des Wirtschaftssystems wie Transport, Energie oder Information darstellen. Insbesondere die Sektoren Transport und Energie hängen ab von geographisch weit ausgedehnten Netzsystemen wie Stromnetzen, Pipelines, Straßen und Schienen (siehe Abb. 1.1).

Der Betrieb solcher Systeme ist eine komplexe Aufgabe, welche eines strukturierten Ansatzes bedarf (vgl. *Spitzer und Marwitz, 2020*) und auch regelmäßige Inspektionen der Anlagen umfasst. Inspektionen großer Infrastrukturen wie Energietransportanlagen oder Eisenbahnen sind traditionell mit erheblichen Kosten verbunden, die entweder erhebliche manuelle Arbeit oder teure Luftfahrzeuge wie Hubschrauber erfordern (vgl. *Mundschau und Quint, 2020*).

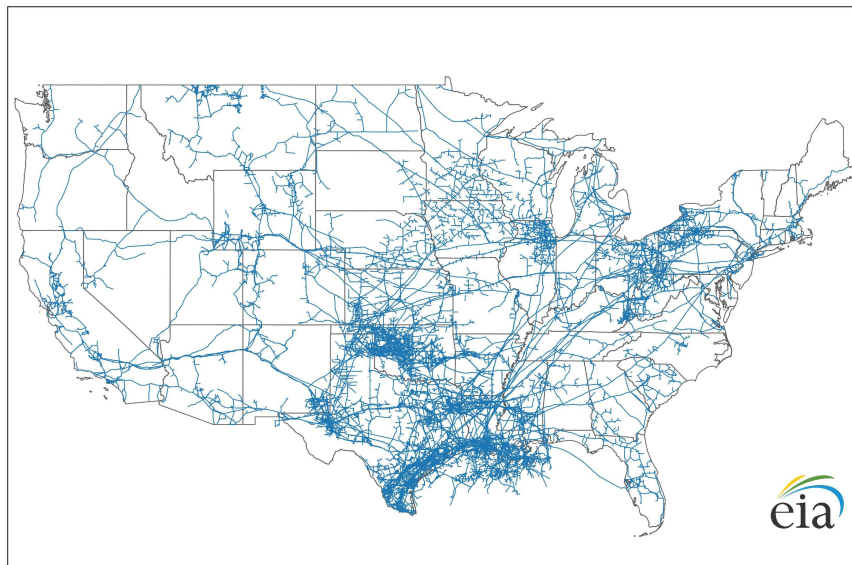


ABB. 1.2: Erdgas Fernleitungsnetz der USA (*Zaffos, 2015*)

So müssen zum Beispiel (z.B.) Erdgasleitungen regelmäßig auf austretendes Methan sowie äußere Gefährdungen durch unerlaubte Baumaßnahmen, sowie den Zustand der Komponenten überprüft werden (vgl. *Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2018*). Hochspannungsfreileitungen werden nach *Schultze (2020)* regelmäßig auf den Zustand der technischen Komponenten hin geprüft. Dabei sind nicht nur Defekte der technischen Komponenten selbst von Relevanz, sondern abhängig von der jeweiligen Nennspannung ebenfalls der Leitungsabstand zueinander, sowie zu umliegenden Objekten. Auch energetische Verluste durch elektrische Entladungen sind von erheblichem wirtschaftlichem Interesse für die Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit. Neben den Anlagen selbst ist die umstehende Vegetation ebenfalls von großem Interesse, da diese beispielsweise (bspw.) bei Stromleitungen zu Kurzschlüssen, Bränden oder mechanischen Beschädigungen bei Sturm führen können. Die Notwendigkeit zur Inspektion dieser Bereiche werde durch den menschenverursachten Klimawandel nochmals intensiviert, da Extremwetterereignisse häufiger vorkämen und eine größer werdende Bedrohung für die Anlagen darstellten. Ähnliche Prüfkriterien sind für die Oberleitungen von Bahntrassen von Bedeutung (*Sánchez-Rodríguez et al., 2019; Nguyen et al., 2018*). Darüber hinaus werden die Schienentrassen selbst mit einer Kombination aus Geradar, hochauflösenden Kameras und Light Detection and Ranging (LIDAR),

sowie mit Wirbelstrommessgeräten inspiziert (*Wolf et al., 2018*). Da dies in der Regel jedoch von speziell ausgerüsteten Instandhaltungszügen aus vorgenommen wird, welche die Fahrtstrecke dafür in Anspruch nehmen, können Beeinträchtigungen des regulären Güter- und Fahrgastbetriebes auftreten und sich die Streckenkapazität reduzieren.

Unter operationellen Gesichtspunkten ist es hierbei oft besonders attraktiv, die Inspektion in die Luft oder gar einen niedrigen Erdorbit zu verlegen, handelt es sich bei den zu inspizierenden Anlagen doch oftmals um Infrastruktur, welche einerseits eine weitläufige geographische Ausdehnung aufweist und andererseits dabei häufig durch unwegsames Gelände führt. Zwar sind Bahntrassen qua ihrer Funktion als Transportweg vergleichsweise leicht zugänglich, Pipelines und Hochspannungsleitungen dienen jedoch oftmals dem Transport von Energie aus oder durch abgelegene Gebiete. Die Fähigkeit für sensortragende Inspektionsplattformen in unerschlossenen Arealen große Distanzen mit einer definierten, aber ausreichend hohen Geschwindigkeit passieren zu können, ist also entscheidend. Neben der erhöhten Mobilität der Sensorplattform selbst, wird die Diagnosekapazität des Fernerkundungssensors durch die Perspektive aus größerer Höhe und den weitaus größeren Blickwinkel von einem Luftfahrzeug oder Satelliten aus, zusätzlich erhöht.

Beide Effekte verschaffen luftfahrzeug- oder satellitengestützten Ferninspektionsmethoden potentiell erhebliche Vorteile hinsichtlich Inspektionskapazität je Datenerhebungseinheit und Zeit. Gleichwohl ist stets die Abwägung entscheidend, ob einerseits die für die jeweilige Aufgabe benötigte Datenqualität aus der Entfernung und mit der vorgesehenen Trajektorienplanung der Sensorplattform erreicht werden kann und andererseits, ob die Gesamtsystemkosten den Einsatz von Trägertechnologien mit höheren Einzelstückkosten rechtfertigen. Letzteres ist insbesondere für Inspektionsaufgaben der Fall, welche auf Grund ihrer großen Ausdehnung die Möglichkeit bieten, hohe System-Fixkosten auf möglichst viele Inspektionskilometer umzulegen. Kommerzielle Anbieter versprechen gegenüber einer Begehungsinspektion Kosteneinsparungen von 45% für eine Befliegung per Helikopter beziehungsweise 60% für den Einsatz von Drohnen (*Delair, 2020*).

Diese wirtschaftlich-betrieblichen Vorteile aufgreifend, etablierten sich in den vergangenen Dekaden bereits vorwiegend luftgestützte Inspektionsmethoden. So werden beispielsweise Helikopter-Inspektionsflüge bei Gaspipelines international in der Regel im zweiwöchentlichen Rhythmus durchgeführt. Teilweise werden die vorgeschriebenen Intervalle dabei sogar freiwillig über das gesetzlich vorgeschriebene Mindestmaß verkürzt und häufiger befliegen, um die Sicherheit weiter zu erhöhen (*Hesselbarth et al., 2001*). Ebenso werden Hochspannungsleitungen sowie Eisenbahntrassen einschließlich ihrer Oberleitungen teilweise per Helikopter überwacht (*Schultze, 2020*).

Wenngleich Diagnose und Datenerhebung heutzutage überwiegend noch mit bodengebunden Methoden oder bemannten Luftfahrzeugen erfolgt, schlagen *Nguyen et al.* (2018) den Einsatz von Drohnen, auch bekannt als Unmanned Aerial Vehicles (Unmanned Aerial Vehicle (UAV)) für automatisierte Inspektionsvorgänge vor. Automatisierung und der Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge machen Luftbildbefliegung für viele Anwendungsfälle wirtschaftlich erheblich attraktiver. Häufig wird durch den Einsatz eines wesentlich kleineren und damit günstigeren Vehikels sowie durch das Einsparen zweier Piloten eine Luftbildbefliegung überhaupt erst konkurrenzfähig. Drohnenhersteller, wie der Marktführer DJI, preisen UAVs an als kostengünstige Möglichkeit die Zuverlässigkeit von Assets zu erhöhen (*DJI, 2019a*), sowie Inspektionsprozesse ausreichend skalierbar zu gestalten, sodass die steigenden betrieblichen Anforderungen beispielsweise eines stark ausgebauten Stromnetzes (*DJI, 2019b*) erfüllt werden können. *Schofield et al.* (2020) halten Drohnen zwar für äußerst vielversprechend, um den steigenden Wartungsaufwand eines alternden Stromnetzes abdecken zu können, halten die Technologie jedoch noch nicht für vollständig ausgereift, weshalb sie ein Rahmengerüst für Multikopterbefliegung vorschlagen. Dieses versorgt die Drohne über einen Cloudservice mit Geolocation Daten zur taktischen Flugplanung und einen Bilderkennungsalgorithmus zur Erkennung von Kabeln und Masten. Die Flight Control Computer der Drohne wird hierbei zusätzlich mit relativen Positionsdaten über die zu inspizierende Anlage gespeist. Einen ähnlichen LIDAR-gestützten Ansatz verfolgen *Guan et al.* (2021): Sie unterteilen die Datenanalyse in Punktwolkenklassifizierung, Schlüsselpunktextraktion Routengenerierung sowie Fehlererkennung. Auch diese Arbeit konzentriert sich auf die taktische Flugausführung sowie die Datenanalyse. Für die Inspektionsdatenauswertung bieten kommerzielle Anbieter wie *Delair* (2020) (siehe Abb. 1.3) Cloud basierte Auswertungssoftware an, mit deren Hilfe Fehler oder zu geringe Abstände in einen digitalen Zwilling der Infrastruktur erfasst und ausgewertet werden können.

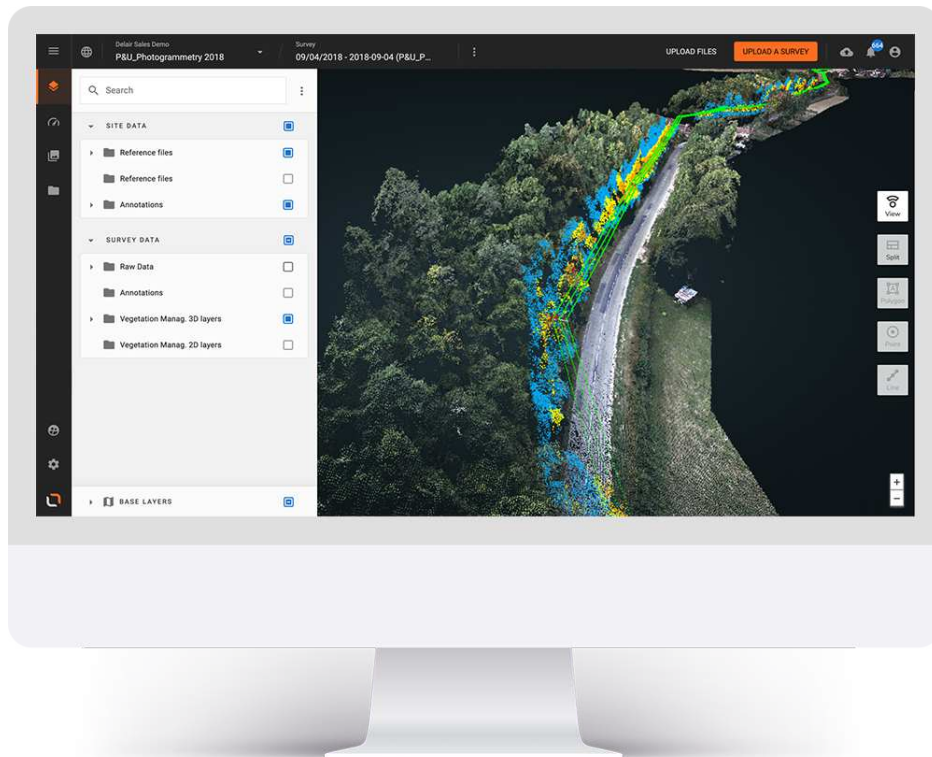


ABB. 1.3: Auswertung von Luftbilddaten für das Vegetationsmanagement von Stromleitungen (*Delair, 2020*)

Die genannten Beispiele setzen dabei auf eine Bandbreite an Fernerkundungssensoren von passiven Kameras im infraroten, sichtbaren bis hinein in den ultravioletten Bereich, bis hin zu aktiven Sensoren wie LIDAR, Radio Detection and Ranging (RADAR) zur Lage- und Geometriebestimmung oder Differential Absorption Light Detection and Ranging (DIAL), mit dessen Hilfe eine durchschnittliche Gaskonzentration über eine Messstrecke hinweg ermittelt werden kann.¹ Eingehende Beschreibungen, welche Inspektionsaufgaben mit Fernerkundungssensoren übernommen werden können, finden sich in Kapitel 3. Nichtsdestotrotz sind nicht alle Inspektionsaufgaben geeignet für Fernerkundungsmethoden. Entscheidende Kriterien, welche einer Fernerkundung entgegenstehen, können beispielsweise sein:

- Perspektive auf zu inspizierende Komponenten
- Auflösung und damit einhergehende maximale Distanz des Sensors zum Inspektionsobjekt
- Art des erforderlichen Diagnostiksignals (Ultraschall z.B. benötigt direkten physischen Kontakt und ist nicht geeignet für Fernerkundung)
- Mechanische Bearbeitung als Teil des Inspektionsvorgangs (z.B. Abkratzen einer Lackschicht zum Freilegen des darunterliegenden Materials)

¹Näheres zu Fernerkundungsmessmethoden in Kapitel 2.1



ABB. 1.4: Eine VTOL Drohne des Anbieters Quantum Systems im Testbetrieb bei der Deutschen Bahn (Köhn, 2020)

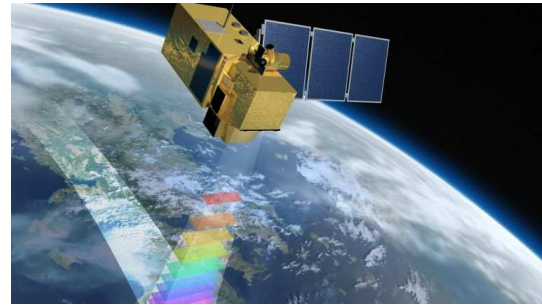


ABB. 1.5: Ein Erdbeobachtungssatellit der Airbus Group (GIM, 2017)

1.2 Infrastrukturspezifische Auswahl eines geeigneten Fernerkundungssystems

Wie in Kapitel 1.1 dargestellt, deckt die vorhandene Literatur also durchaus Ansätze einer individuellen und teilweise automatischen Befliegung durch einzelne Luftfahrzeuge ab. Kaum zu finden sind jedoch Arbeiten, welche den gesamtsystemischen Gedanken des Zusammenspiels mehrerer UAV untersuchen bzw. die Skalierbarkeit bestimmter Drohnenkonfigurationen und Betriebskonzepten in den Blick nehmen und sowohl operationell wie auch wirtschaftlich gegenüberstellen und in den Gesamtkontext an möglichen technologischen Alternativen einordnen.

Für den Fall einer grundsätzlichen Eignung von Fernerkundungsmethoden zur Durchführung einer bestimmten Inspektionsaufgabe, kommen folgende Trägerplattformen in Frage:

- Helikopter
- bemanntes Kleinflugzeug (General Aviation)
- Starrflügel Drohnen
- Drehflügel Drohnen, auch als Multikopter bekannt
- Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Drohnen
- Aerostatische Luftfahrzeuge (Luftschnäbel, Ballons)
- Satelliten

Je nach geometrischer Form und geographischer Ausdehnung der zu inspizierenden Infrastruktur, sowie der durchzuführenden Diagnostik ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an *Flughöhe*, *maximaler Reisegeschwindigkeit* und *Nutzlast*.

Diese Parameter werden teilweise durch Randbedingungen des Messvorganges selbst limitiert: So determiniert die Flughöhe zusammen mit der Winkelauflösung der Kamera mit Objektiv, welche Auflösung die gewonnen Bilddaten hinsichtlich Pixelgröße (Kantenlänge je Pixel) bezogen auf die Projektionsebene haben. Weiterhin bestimmt die Cruise Geschwindigkeit zusammen mit der Belichtungszeit das Ausmaß der Bewegungsunschärfe und wird durch notwendige Belichtungsstärke sowie Sensorempfindlichkeit und -Rauschen limitiert. Des weiteren können qualitativ unterschiedliche Sensor und Linsensysteme zwar teilweise die eben genannten Randbedingungen kompensieren, erfordern dann jedoch im Einzelfall eine höhere Nutzlast.²

Flughöhe, Reisegeschwindigkeit und mitzuführende Nutzlast beeinflussen die Möglichkeiten der Auswahl einer bestimmten Trägerplattform sowie innerhalb deren Fähigkeitsspektrums wiederum die mit dieser Nutzlast erzielbare Reichweite.

Die Reichweite einer Trägerplattform ist jedoch in der Regel keine harte Anforderung, sondern eine Kenngröße, welche sich auf das Betriebskonzept und den durchzuführenden Flugplan auswirkt.

Höhere Nutzlast-Reichweiten Fähigkeiten einzelner Drohnentypen können potentiell zu Effizienzsteigerungen in der Routenführung einerseits sowie zu geringeren Kapitalinvestitionen andererseits führen, da gegebenenfalls eine geringere Anzahl von Einzelsystemen beschafft werden muss, um ein bestimmtes Betriebsgebiet abzudecken (siehe Abb. 1.6). Im Extremfall eines Erdbeobachtungssatelliten kann mitunter der ganze Planet Erde oder Teile dessen innerhalb der Inklination des jeweiligen Orbits (Abb. 1.7) von einem Einzelsystem abgedeckt werden.³

Abzuwägen sind dabei die positiven Effekte eines Fähigkeitszuwachses zwischen zwei Systemalternativen gegenüber den potentiell höhere Investitionsausgaben sowie Betriebskosten eines Einzelsystemes. Investitionsausgaben wie Betriebskosten können sich dabei einerseits durch die Größe und Komplexität des Luftfahrzeuges selbst unterscheiden, andererseits aber auch durch Faktoren wie Art und Komplexität der benötigten Betriebsinfrastruktur am Boden sowie der Personalintensität des Flugbetriebes.

Während für ein kleines Inspektionsobjekt diese Abwägung zwischen Technologiealternativen in der Regel vergleichsweise trivial ist, kann die Entscheidung zwischen unterschiedlichen Plattformen bei komplexen Infrastrukturen durchaus herausfordernd und multidimensional hinsichtlich der gegenläufiger Effekte bei den Eingangsparametern sein, wie zum Beispiel erhöhter Befliegungsleistung bei erhöhten Investitionen.

²Details zu Fernerkundungssensorik in Kapitel 2

³allerdings unter gewissen Randbedingungen, wie Auflösung, Revisit Times, Atmosphärischer Durchdringung, etc. Näheres, siehe Kapitel 2.3

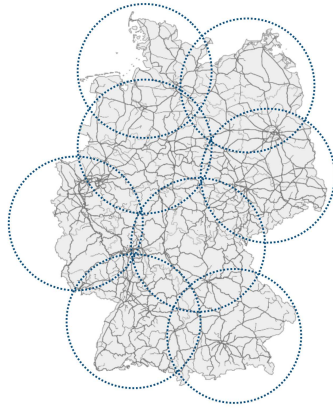


ABB. 1.6: Operationsradien um eine beispielhafte Konfiguration von Startbasen

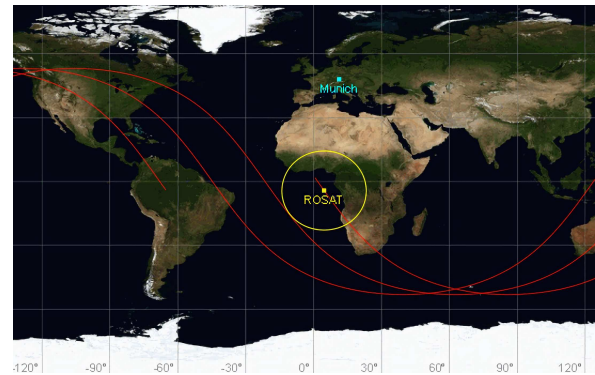


ABB. 1.7: Bodenspur eines Erdbeobachtungssatelliten mit einer Inklination von 53° ([Wikipedia, 2011](#))

1.3 Einordnung von satellitengestützten gegenüber luftgestützten Fernerkundungssystemen

Im Vordergrund der Auswahl einer techno-ökonomisch geeigneten Trägerplattform steht in dieser Arbeit die Abwägung zwischen verschiedenen unbemannten luftgestützten Technologien also Drohnen, da diese im Vergleich zu bemannten luftgestützten Systemen grundlegend geringere Systemkosten versprechen.

Gleichwohl wird es als notwendig erachtet, die Wettbewerbsfähigkeit dieser Drohnenplattformen gegenüber satellitengestützter Fernerkundung einzuordnen. Dies geschieht einerseits im Hinblick auf die qualitativen Fähigkeiten von Satelliten, welche in Kapitel 2.3 und im konkreten Anwendungsfall in Kapitel 3 herausgearbeitet werden. Dabei wird insbesondere die benötigte Auflösung bei einzelnen Inspektionsaufgaben betrachtet sowie auch die grundsätzliche Verfügbarkeit von bestimmten benötigten Sensortypen und Wellenlängen auf den jeweiligen Trägerplattformen.

Weiterhin wird in Kapitel 2.3 und der vergleichenden Systembewertung in 5.1.4 und 5.2.3 die Wirtschaftlichkeit von dedizierten Drohnensystemen gegenüber zugekauften am Markt verfügbaren Satellitendaten gegenübergestellt. Dies ist notwendig, um für die Anwendungsfälle, in denen Satelliten qualitativ anwendbar wären, festzustellen, ob Drohnensysteme unter Kostengesichtspunkten dennoch wirtschaftlich sein können.

1.4 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung einer Untersuchungsmethode, mit der verschiedene Sensorträgerplattformen hinsichtlich ihrer Eignung für die Fernerkundung verschiedener weiträumiger Infrastrukturen verglichen werden können. Besonderer Fokus soll auf dem Vergleich unterschiedlicher Typen von unbemannten Luft-, aber auch Raumfahrzeugen liegen, um mit der entwickelten Methodik Technologiealternativen gegeneinander abwägen zu können.

Zunächst ist es hierfür erforderlich, die Inspektionsbedarfe für besagte weitläufige Infrastrukturen festzustellen. Dies schließt sowohl die Häufigkeit der Befliegung ein, wie auch insbesondere die Art und Güte der für die Diagnostik erforderlichen Daten, welche zu erheben sind. Aufbauend darauf soll die grundsätzliche Eignung der Trägerplattformen zur Erfassung der für eine bestimmte Inspektionsaufgabe benötigten Daten erörtert werden. Von Interesse sind dabei erstens, welche Sensoren und daraus resultierende Nutzlasten benötigt werden, und zweitens, mit welchem Abstand und welcher Geschwindigkeit die Sensorik über das Ziel geführt werden kann. Dies beinhaltet auch eine qualitative Überprüfung, ob Satelliten als Trägerplattform für eine bestimmte Aufgabe in Frage kommen.

Zur Untersuchung von luftgestützter Fernerkundung ist es notwendig, auf Grundlage bestimmter Trägerplattformen System-of-Systems zur Fernerkundung zu konzipieren, mit denen eine betrachtete Infrastruktur effizient abgedeckt werden kann. Für die Konzeptionierung von Bedeutung sind hierbei insbesondere unterschiedliche Nutzlast-Reichweiten-Profile von VTOL-, Starrflügel- und Drehflügeldrohnen einerseits und deren operationelle Betriebsinfrastruktur sowie Kostenstruktur andererseits. Luftschiffe und Ballons werden keiner tiefergehenden Betrachtung unterzogen, da ihre Fluggeschwindigkeit als zu gering und ihre Windanfälligkeit als zu groß eingeschätzt werden, um ernsthaft für regelmäßige Inspektionen in Betracht gezogen zu werden.

Für jede Trägerplattform ist es erforderlich, eine Verteilung von Start- und Landepunkten (bzw. Operationsbasen) auf dem Zielgebiet vorzunehmen und ausgehend hiervon einen Flugplan zu erstellen, mit dem die komplette Infrastruktur abgeflogen werden kann. Die Anzahl an Operationsbasen soll dabei grundsätzlich für jede Trägerplattform innerhalb deren Operationsradius frei wählbar sein. So entsteht ein großräumiges Einsatz- und Verteilungskonzept zur Ermittlung des Mengenbedarfs und der Einsatzkosten.

In einem weiteren Schritt soll auf Basis der erstellten Missionspläne ein Kostenmodell aufgebaut werden mit typischen Eingangsparametern für die jeweiligen UAV-Klassen. Abhängig von der Anzahl an Einzelsystemen sowie deren Befliegungseffizienz und Betriebskosten soll so ein wirtschaftlich-quantitativer Vergleich zwischen den luftgestützten Technologiealternativen gezogen werden.

1.5 Aufbau der Arbeit

Nach der Hinführung zum Sachverhalt in Kapitel 1 erfolgt in Kapitel 2 eine Erörterung möglicher Fernerkundungssensoren. Dabei wird deren prinzipielle Funktionsweise erläutert, sowie deren Eignung, Einsatz und Limitationen in luft- oder satellitengestützten Trägerplattformen. In Kapitel 3 werden die Arten sowie der Umfang der vorhandenen Inspektionsaufgaben herausgearbeitet, welche für Fernerkundung aus der Luft oder dem All geeignet sind. Kapitel 4 entwickelt die Methodik, mit Hilfe derer die Systems-of-Systems Konzeptionierung für luftgestützte Fernerkundungssysteme vorgenommen sowie deren Kostenbasis bewertet wird. Diese wird in Kapitel 5 verwendet, um für das Deutsche Bahnnetz sowie das US-amerikanische Erdgas Fernleitungsnetz eine geeignetes System-of-Systems zur Fernerkundung zu definieren. Kapitel 6 diskutiert die erzielten Ergebnisse und ordnet sie in den Rahmen alternativer Fernerkundungsmethoden, insbesondere satellitengestützter, ein. Abschließend fasst Kapitel 7 die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick hinsichtlich weiterführender Forschung.

2. Grundlagen drohnen- und satellitengestützter Fernerkundung

Sowohl bemannte wie unbemannte Luft- wie auch satellitengestützte Datenerfassungsplattformen greifen auf die physikalischen Prinzipien der Fernerkundung mittels elektromagnetischer Wellen zurück. Nach DIN 18716 ist Fernerkundung wie folgt definiert:

Fernerkundung ist die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-)Felder. Als Informationsträger dient dabei die von der Erde reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung.
(DIN Normenausschuss Bauwesen, 2017)

Nach dieser Definition wären auf grundlegender Ebene sämtliche wechselwirkenden physikalischen Energiefelder des Standardmodells der Teilchenphysik ([Cottingham und Greenwood, 2007](#)) Mittel zu Fernerkundung und damit alle Bosonenteilchen. Gluonen, Z-Bosonen sowie W-Bosonen spielen jedoch aufgrund ihrer Wechselwirkung mit anderen Teilchen auf sehr kurze Distanz lediglich in der Teilchenphysik eine Rolle und sind somit nicht im engeren Sinne als Fernerkundung zu betrachten. Das Higgs-Boson als Trägerteilchen der Gravitationskraft würde grundsätzlich durchaus unter die Kriterien der Fernerkundung fallen und so greift die Astrophysik auf Interferometer wie LIGO ([Abbott et al., 2009](#)) oder LISA ([Bartolo et al., 2016](#)) zurück, um über Gravitationswellenmessungen sehr weit entfernte massereiche Ereignisse zu vermessen. Dies sind jedoch offenkundig keine relevanten Anwendungsfälle im Kontext dieser Arbeit, weswegen Fernerkundung im engeren Sinne sich auf Photonen als Trägerteilchen und damit elektromagnetische Wellen unterschiedlichster Wellenlänge beschränkt.

Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung reicht dabei von Röntgen über ultraviolettes und visuell sichtbares Licht weiter über nahes, mittleres und fernes Infrarot und Mikrowellen bis hin zu Radiowellen, wie in Abbildung (Abb.) 2.1 dargestellt.

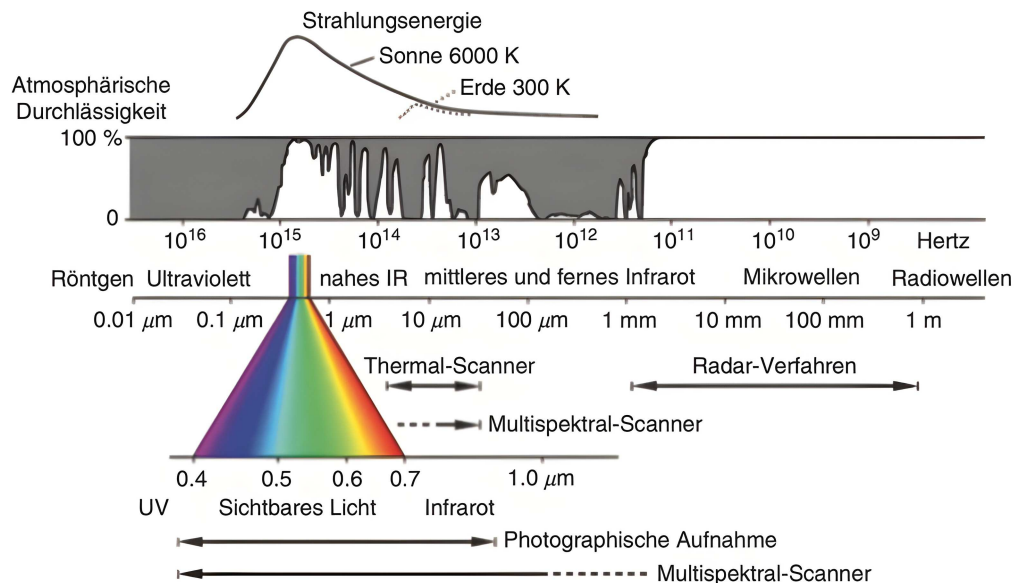
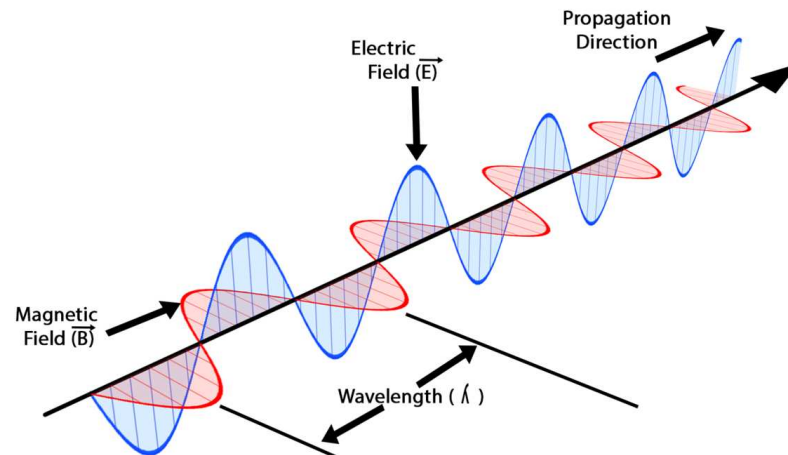
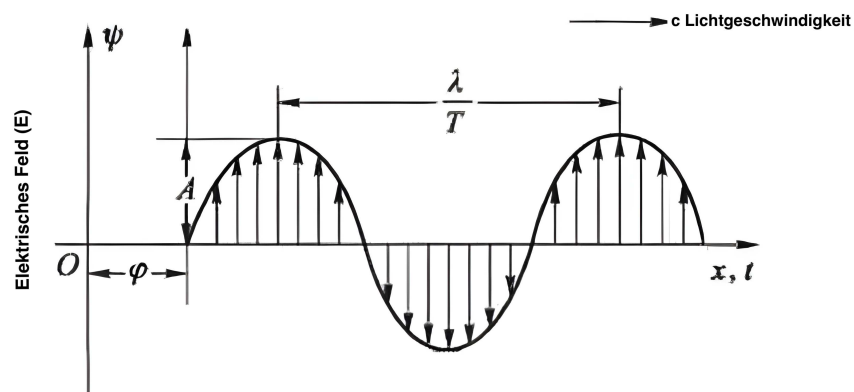


ABB. 2.1: Nutzung des elektromagnetischen Spektrums für Fernerkundungssensorik (*Albertz, 2001*, S.11)

2.1 Fernerkundungssensorik

Fernerkundungssensoren erfassen verschiedene Eigenschaften elektromagnetischer Wellen und gewinnen darüber Informationen über die Objekte, welche diese Wellen ausgesandt oder reflektiert haben. Abbildung 2.2 zeigt die sich gegenseitig hervorhebenden und orthogonal zueinander stehenden magnetischen (B) und elektrischen (E) Felder, wie sie durch den Raum propagieren. Abbildung 2.3 stellt ausschließlich den elektrischen Teil der Welle Ψ im Querschnitt dar. Fernerkundungssensoren detektieren dabei je nach Typ, die Wellenlänge λ und Periodendauer T (während die Frequenz $f = 1/T$ entspricht), die Amplitude A , die Phasenverschiebung ϕ oder die Polarisation eines homogen ausgerichteten Signals und damit den Rotationswinkel entlang der Propagationsachse x, t . Die Propagationsachse kann sowohl räumlich (x) wie auch zeitlich (t) aufgefasst werden. Die ursprüngliche Strahlungsquelle kann das zu beobachtende Objekt selbst, Sonneneinstrahlung oder eine eigene Strahlungsquelle des Fernerkundungssensors sein, welche reflektiert wird.


 ABB. 2.2: Elektromagnetische Welle ([Wikimedia, 2018](#))

 ABB. 2.3: Elektrischer Feldanteil einer elektromagnetischen Welle ([Li, 2021, S. 3](#))

Ein Photon ist nach [Emery und Camps \(2017, S. 45ff.\)](#) das Trägerteilchen eines elektromagnetischen Wellenpaketes und besitzt als Quantum Strahlungsenergie Q . Die Flusslinien der Photonen bezeichnet man als Strahlen. Die temporale Ableitung der Strahlungsenergie aller Photonen in einem Strahl dQ/dt wird elektromagnetischer Fluss Φ genannt und ist analog zur Strahlungsleistung.

Fernerkundungssensoren funktionieren dadurch, dass Photonen auf den Detektor treffen und durch ihre Strahlungsenergie in diesem elektrische Signale auslösen, welche als digitale Information weiterverarbeitet werden ([Fossum, 1997; Nayak et al., 2012](#)). Da alle Fernerkundungssensoren unterschiedslos berührungslos funktionieren, können sie unterschieden werden nach den Kriterien der Strahlungsquelle und der gemessenen Welleneigenschaft ([Emery und Camps, 2017, Kapitel 2](#)):

- Gemessene Welleneigenschaft

- Amplitude bzw. Strahlungsleistung
- Wellenlänge / Frequenz bzw. Strahlungsenergie eines einzelnen Photons
- Phasenverschiebung zwischen zwei Signalen
- Polarisation eines Signales
- Strahlungsquelle
 - intern, autark bzw. aktive Sensorik
 - extern bzw. passive Sensorik

In den folgenden Unterkapiteln werden Fernerkundungsmethoden in erster Linie entlang der genutzten Wellenlängen bzw. Frequenzbänder (siehe Abbildung 2.1) erklärt. Innerhalb einzelner Bänder wird auf Besonderheiten hinsichtlich der Strahlungsquelle sowie anderer Welleneigenschaften eingegangen.

2.1.1 Radio-, Mikrowellen, Synthetic Aperture Radar

Während Radio- und Mikrowellen als rein passive Sensoren im Bereich der Radioastronomie weite Verbreitung finden (*Burke et al., 2019*), werden die Frequenzbereiche im Rahmen der terrestrischen Fernerkundung vornehmlich beim RADAR angewendet. *Richards et al. (2010)* sowie *Ilioudis (2021)* beschreiben das RADAR als aktives Sensorsystem, bei dem mit Hilfe einer Senderantenne ein kurzer Radio- oder Mikrowellenpuls ausgesendet wird, welcher vom zu detektierenden Objekt reflektiert und anschließend von der Empfängerantenne registriert wird. Über den Abstrahlungswinkel des RADAR-Pulses sowie die Laufzeit des Signales kann die Position des Objektes bestimmt werden, über eine durch den Dopplereffekt hervorgerufene Änderung der Wellenlänge ebenso die Relativgeschwindigkeit.

Li (2021, S. 7) weist darauf hin, dass Mikro- und insbesondere Radiowellen in deutlich geringerem Maße von atmosphärischer Streuung oder Absorption betroffen sind als kürzerwellige Frequenzbänder und somit Wolken, Rauch, Nebel, Regen oder Schneefall durchdringen können. Je nach genutzter Wellenlänge können Mikrowellen allerdings auch genutzt werden, um genau diese Ereignisse und Objekte zu vermessen, wie *Falconi et al. (2018)* ausführen.

Im Gegensatz zu konventionellen Radaren, welche einen im Bezug auf die Messung statischen Sender und Empfänger haben, emulieren Synthetic Aperture Radar (SAR)-Radare eine wesentlich größere Antenne, indem sie ein bestimmtes Objekt von mehreren Blickwinkeln aus aufnehmen (*Moreira et al., 2013*). Dabei bewegt sich die Trägerplattform in Form eines Flugzeugs oder Satelliten, während das SAR-Radar zeitlich versetzt mehrere Einzelaufnahmen des Beobachtungsobjektes erstellt, die Messdaten einschließlich Amplitude und Phase des reflektierten Signals speichert und anschließend bei der Datenauswertung zusammensetzt, sodass

ein Lagebild entsteht, als hätte die Antenne die effektive Länge zwischen erster und letzter Messung. Ein SAR-Radar weist im Funktionsprinzip somit gewisse Parallelen mit einem Phased Array RADAR auf, welches ebenfalls aus mehreren Einzelantennen zusammengesetzt ist. Das SAR-Radar hingegen fungiert als ein-dimensionales Array und die Einzelantennen bestehen tatsächlich aus derselben Antenne, welche sich über die Zeit hinweg über das Antennenarray hinwegbewegt. Ähnlich dem Phased Array RADAR jedoch kann durch die Zusammensetzung des Gesamtbildes aus den Einzelmessungen eine Steigerung der Azimuthauflösung erreicht werden.

2.1.2 Infrarot (IR)

Nach [Li \(2021, S.6\)](#) gliedert sich der Infrarotbereich in die Frequenzbänder des nahen ($0,76$ bis $3\mu m$), mittleren (3 bis $6\mu m$) und fernen (6 bis $15\mu m$) Infrarotlichts.

Nahes Infrarot findet im Bereich der Fernerkundung weit verbreitete Anwendung, da ein vergleichsweise großer Teil des Sonnenlichts in diesem Spektralbereich von der Erdoberfläche und Objekten auf ihr reflektiert wird, weswegen es auch reflektives Infrarot genannt wird.

Mittelwelliges Infrarot hingegen ist thermische Strahlung, wird also von Objekten auf Grund ihres Temperaturzustandes emittiert, je nach Temperatur mit einem Spektralmaximum anderer Wellenlänge (siehe Abbildung 2.4). Der mittlere IR-Bereich eignet sich nach Li besonders gut, um Objekte mit Temperaturen von mehreren hundert Grad Kelvin, wie zum Beispiel Feuer, Vulkane oder Raketenantriebe zu erkennen. Er wird allerdings von atmosphärischer Absorption und Streuung beeinflusst, sodass Wolken, Regen oder Nebel ein Hindernis darstellen.

Längerwellige, ferne IR-Strahlung hingegen ist von atmosphärischen Störungen nicht in diesem Maße betroffen und durchdringt feuchte Luftmassen wesentlich leichter. Auch ist es in der Lage kältere Objekte wahrzunehmen.

2.1.3 Sichtbares Spektrum

Sichtbares Licht im vergleichsweise schmalen Spektralband zwischen 380 nm und 760 nm kann vom menschlichen Auge wahrgenommen werden. Dieser Bereich entspricht nach ([Emery und Camps, 2017, S. 59](#)) dem Strahlungsmaximum der Sonne sowie eines atmosphärischen Transmissionsfensters, sodass ein Großteil der auf Reflexion basierender Fernerkundung sich auf diesen Bereich des elektromagnetischen Spektrums konzentriert. Während gasförmige Atmosphäre gute Transmissionseigenschaften aufweist, unterliegt dieser Spektralbereich doch erheblichen Absorptions- und Streuungsrestriktionen durch flüssige oder feste Atmosphärenbestandteile wie insbesondere Wolken und Nebel. Passive Kamerasensoren sind zudem auf Tageslicht als natürliche Beleuchtung angewiesen.

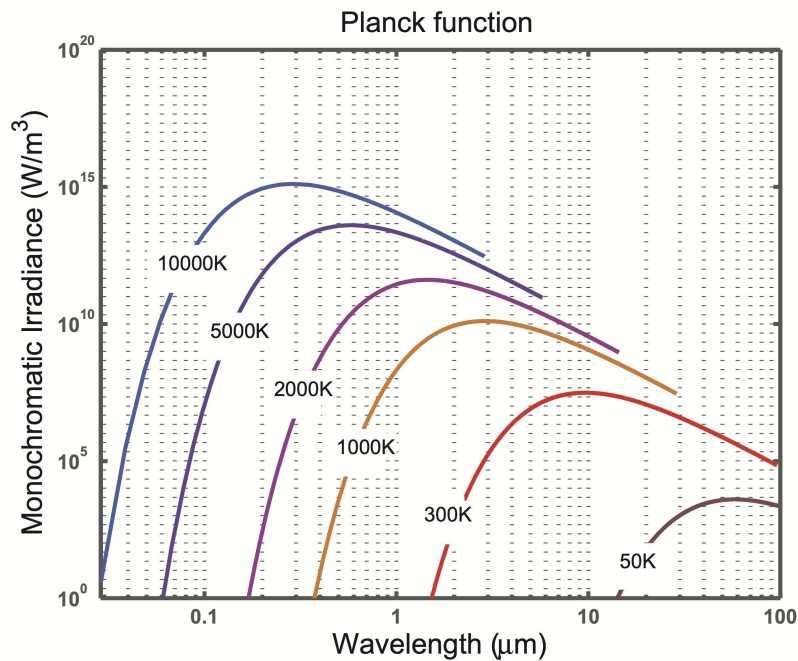


ABB. 2.4: Spektralverteilung einer Schwarzkörperstrahlenquelle bei diskreten Temperaturniveaus (*Kuriakose, 2013, S. 32*)

Die große Bandbreite an natürlicher Illumination mit Photonen unterschiedlicher Wellenlänge kombiniert mit der Selektivität chemischer Stoffe, mit der bestimmte Photonen diskreter Wellenlängen bzw. Energieniveaus durch Anregung der äußeren Elektronenschalen absorbiert werden, ermöglicht über Spektralanalyse zudem eine Fülle an Informationen über die chemische Zusammensetzung des reflektierenden Objektes (*de Moura et al., 2017*). Als einen weiteren entscheidenden Vorteil des sichtbaren Spektrums, heben *Aasen et al. (2018)* die hohe geometrische Auflösefähigkeit auf Grund der vergleichsweise kurzen Wellenlänge hervor. Diese Farbinformation des Lichtes im Zusammenspiel mit einer hohen Auflösung kann besonders zuträglich sein im Bereich automatisierter Bildverarbeitung und Objekterkennung (*Sherrah, 2016*).

2.1.4 Gamma-, Röntgen- und Ultraviolette Strahlung

Spektralbereiche unterhalb von 380 nm spielten in der terrestrischen Fernerkundung in der Vergangenheit hauptsächlich im Bereich der Ozonschichtvermessung eine Rolle, so *Krueger (2014)*. Für viele insbesondere hochauflösende Anwendungen führt er als Herausforderungen beim Einsatz von UV-Spektralbändern an, dass herkömmliches Glas in Sensoroptiken Wellenlängen kleiner als 400 nm absorbieren und somit spezielle Quarzoptiken entwickelt werden mussten. Zudem enthalte der UV-Bereich weniger als 10% der solaren Strahlungsleistung, welche durch die Ozonschicht um bis zu weitere drei Größenordnungen reduziert wird.

Mittlerweile jedoch beschreiben *Suo et al. (2021)* die Nutzung von ultraviolettem Licht zur satellitenbasierten Erkennung von Ölteppichen.

Darüber hinaus finden UV-Spektralbereiche regelmäßig bei satellitengestützten astronomischen Teleskopen Anwendung, wie beispielsweise beim Hubble Space Telescope (*Piotto et al., 2015*). Aber auch noch höherenergetische Strahlung wird verwendet wie zum Beispiel beim Röntgeninstrument eROSITA an Bord des Weltraumobservatoriums Spektr-RG (*Predehl et al., 2021*) oder beim SWIFT Gamma Ray Explorer (*Breeveld et al., 2010*).

2.1.5 Laser Detection and Ranging (LIDAR) und Differential Absorption LIDAR (DIAL)

Laser Detection and Ranging weist große Ähnlichkeiten mit dem oben beschriebenen Verfahren des Radio Detection and Ranging auf. Bei beiden Verfahren handelt es sich um aktive Methoden, welche die zu messende Strahlung zunächst selbst emittieren und am Messobjekt reflektieren bevor sie detektiert wird. Wie von *Wandinger (2005)* in Abbildung 2.5 dargestellt, besteht der Transmitter beim LIDAR aus einer Laserquelle sowie strahlführender Optik. Die Receiverinheit besteht auf optischen Spiegeln zur Bündelung und Strahlungsführung, auch Teleskop genannt, sowie des eigentlichen Detektors, über welchen der Data Acquisition Computer die Laufzeit des Signals bestimmt und somit die Entfernung zum reflektierenden Objekt ermitteln kann.

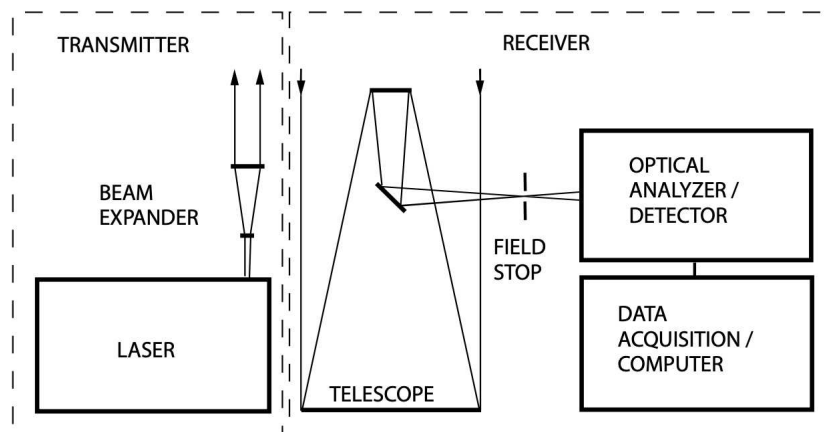


ABB. 2.5: Funktionsschema eines LIDAR Sensors (*Wandinger, 2005*, S. 3)

Bei in LIDAR Geräten verwendeten Lasern (kurz für light amplification by stimulated emission of radiation) handelt es sich um eine Strahlungsquelle, in welcher ein Lasermedium (wie z.B. Gase, Kristalle oder Flüssigkeiten) durch äußere Energiezufuhr angeregt wird. Dieses emittiert in der Folge eine kohärente Photonenstrahlung, welche eine näherungsweise gleiche Wellenlänge und Phase aufweisen und

zudem in der selben Polarisationssebene schwingen. Laser, insbesondere kontinuierlich emittierende Dauerstrichlaser, weisen somit eine enge spektrale Bandbreite auf, sind also monochrom. LIDAR nutzt je nach Anwendung unterschiedliche diskrete Spektrallinien. Gemäß *Wandinger* (2005, S. 4) erstrecken sich die verwendeten Wellenlängen je nach eingesetztem Laser von 250nm bis $11\mu\text{m}$. Bei PulsLasern mit besonders kurzer Pulsdauer tritt der Fouriereffekt der Spektralbandaufweitung auf, das austretende Licht ist also nicht mehr monochrom im engeren Sinne. Für die tiefergehenden physikalischen Grundlagen sei der interessierte Leser verwiesen an *Quimby* (2006) oder *Singh et al.* (2012).

Eine besondere Variante stellt das Differential Absorption LIDAR (DIAL) dar, mit Hilfe dessen Gaskonzentrationen in der Atmosphäre zwischen dem Sensorträger und dem Untergrund gemessen werden können. *Browell et al.* (2003) beschreibt die Funktionsweise als ein Doppel-LIDAR-System, das je eine Wellenlänge verwendet, welche von zu detektierenden Gas stark absorbiert wird (“on” Wellenlänge λ_{on}), und eine, welche nur schwach absorbiert wird (“off” Wellenlänge λ_{off}) und als Referenz dient. Die Durchschnittliche Gaskonzentration entlang des Laserlaufes ist dabei proportional zur Differenz zwischen der am DIAL-Sensor gemessenen reflektierten Strahlungsleistungen $P_{off} - P_{on}$ unter der Annahme einer gleichen Emissionsleistung beider Wellenlängen bzw. Korrektur um einen gegebenenfalls vorhandenen Unterschied Emissionsleistung. Eingesetzt wird das Verfahren beispielsweise zur Erkennung von Wasserdampf (H_2O), Ozon (O_3), Methan (CH_4), Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxiden (NO_x), Ammoniak (NH_3), und vielen weiteren.

2.1.6 Hyperspektral- vs. Multiband-Bildgebung

Farbbildgebung im menschlichen Auge funktioniert über das Erfassen von spezifischen Wellenlängen in sogenannten Zapfenzellen oder kurz Zapfen. *Bowmaker und Dartnall* (1980) beschreiben anlehnend an Abbildung 2.6 die spektrale Absorptionskurve und damit die Sensitivität der drei Typen an Zapfenzellen mit Absorptionsmaxima bei 420 nm (blau), 534 nm (grün) und 564 nm (rot). Eintreffende Photonen regen die einzelnen Zapfentypen in unterschiedlichem Maße an, weshalb vom Gehirn über die Differenz der Anregungspotentiale die Signalwellenlänge errechnet werden kann.¹ Ähnlich wie beim biologischen Vorbild funktionieren auch halbleiterbasierte Sensorchips, welche für bestimmte Wellenlänge sensibel sind.

¹Zusätzlich sind im menschlichen Auge noch sogenannte Stäbchenzellen (gestrichelte Linie) vorhanden, welche als Schwachlichtsensoren keine unmittelbare Rolle in der Farbwahrnehmung einnehmen.

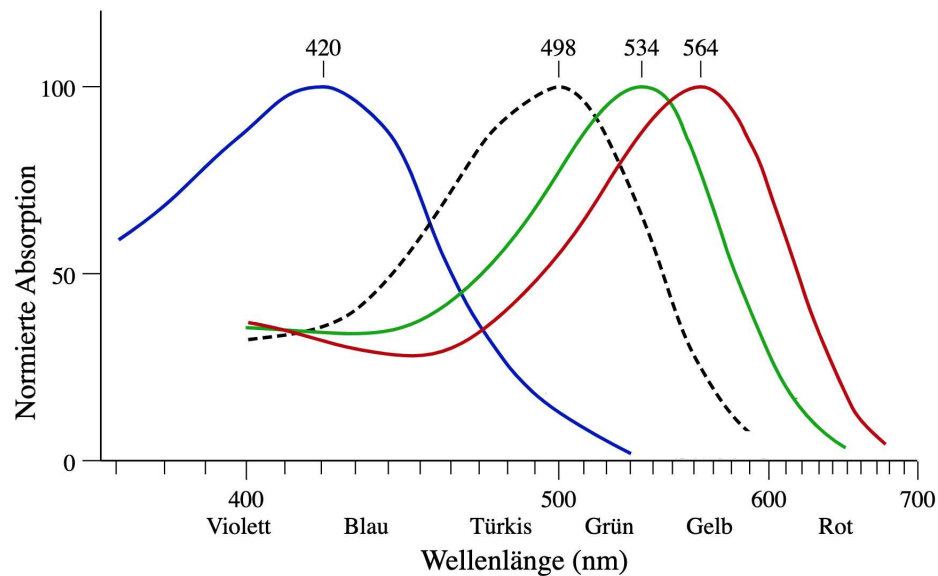


ABB. 2.6: Sensitivität von Zapfen- und Stäbchenzellen des menschlichen Auges (in Anlehnung an *Bowmaker und Dartnall, 1980*, S. 505)

Das Verfahren der Farbauflösung mit mehreren diskreten detektierten Wellenlängen kann als Multiband-Bildgebung bezeichnet werden. Es zeichnet sich dadurch aus, dass eine begrenzte Anzahl (typischerweise nicht mehr als 15 Kanäle) an Frequenzbändern für die Spektralanalyse zum Einsatz kommt. *Hagen und Kudenov (2013)* kritisieren, dass gemeinhin keine einheitliche oder zumindest trennscharfe Abgrenzung zur Hyperspektral-Bildgebung vorgenommen wird. Grundsätzlich unterscheiden sich beide Ansätze allerdings dadurch, dass bei letzterem eine deutlich größere Anzahl an Spektralbändern zur Informationsgewinnung genutzt werden, welche oft auch unmittelbar aneinander angrenzen und somit für jeden Pixel ein (näherungsweise) kontinuierliches Spektrum auf einem Vielfachen an diskreten Kanälen erfasst wird. Nach *ElMasry und Sun (2010)* können die einzelnen Kanäle alle gleichzeitig für das gesamte Bild oder sequenziell für einzelne Pixel oder Pixelreihen erfasst werden, sodass Voxel entstehen, also dem 2-dimensionalen Bild eine dritte Dimension der Farbtiefe hinzugefügt wird. Auf diese Weise entstehen sogenannte "Datenwürfel" wie in Abbildung 2.7 zu sehen. Diese Informationsdichte ermöglicht es für einzelne Strukturen sehr genaue Rückschlüsse auf deren chemische oder biologische Zusammensetzung zu treffen, indem bestimmte Signaturen erkannt werden (*Lu et al., 2020*).

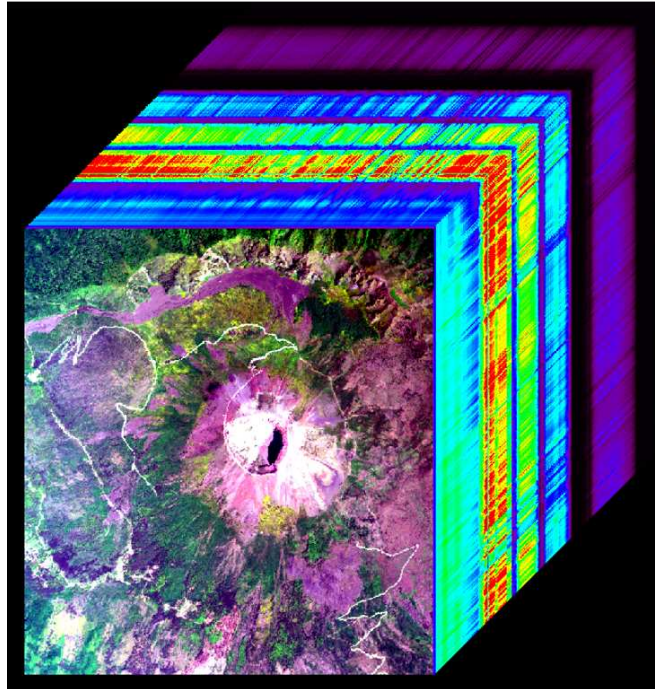


ABB. 2.7: Datenwürfel einer Hyperspektralaufnahme des Vulkan Vesuv ([ESA, 2021](#))

Die Kombination aus elektromagnetischen Wellen des infraroten, optischen, sowie ultravioletten bis hin zum Röntgenspektrum in aktiver oder passiver Ausführung ermöglicht in Summe die Detektion von einer Bandbreite an möglichen Auffälligkeiten von Verfärbungen über Brüche, Risse bis hin zu geometrischen Veränderungen der Erdoberfläche. Welche dieser Detektionsfähigkeiten von Interesse ist, hängt vom genauen Anwendungsfall ab und wird in Kapitel 3 genauer erläutert.

2.2 Fernerkundung durch (unbemannte) Luftfahrzeuge

Während Luftbildaufnahmen und Fernerkundung im 20. Jahrhundert vorwiegend von pilotierten Flugzeugen, Helikoptern oder Satelliten [Schultze \(2020\)](#) aus durchgeführt wurden, spielen unbemannte Luftfahrzeuge zunehmend eine immer bedeutendere Rolle, da kleinere Flugzeuge eingesetzt und die Befliegungskosten wesentlich reduziert werden können.

Eine nicht abschließende Übersicht der Einsatzzwecke von UAVs zur Fernerkundung liefern [Toro und Tsourdos \(2018a,b\)](#) als Artikelsammlung. Aufgeführt werden beispielsweise die Anwendungsfälle der Feinstaubmessung ([Alvarado et al., 2017](#)) und des Monitorings von Methanemissionen und -Leckagen ([Greatwood et al., 2017](#)). [Ni et al. \(2017\)](#) beschreiben das Monitoring von Feldfrüchten in der Landwirtschaft, welches die Methodiken verwendet wie den Normalized Difference Vegetation Index, Ratio Vegetation Index und Leaf Area Index. Dabei werden beispielsweise die Stickstoffakkumulation der Blätter und das Blatt-Trockengewicht gemessen. [Villa et al. \(2016\)](#) beschreiben die Messung von Luftverschmutzung mittels Gassensoren für CO₂, CO, NO₂ and NO. Darüber hinaus beschreiben [Toro und Tsourdos \(2018c,d\)](#) in *UAV or Drones for Remote Sensing Applications* weitere konkrete Anwendungen drohnen-gestützter Fernerkundung. [Adão et al. \(2017\)](#) und [Lu et al. \(2020\)](#) gehen weiterhin auf hyperspektrale Sensorik im Kontext der UAV Fernerkundung ein, welche insbesondere für die Land- und Forstwirtschaft zur Vermessung des Pflanzenwachstums sowie der Bodenqualität von Interesse sind.

Die Ground Sample Distance (GSD) ist ein zentrales Konzept in der Fernerkundung, der Luftbildfotografie und der Drohnenkartografie. Sie beschreibt die kleinste Abstandsmaßeinheit, die auf dem Boden durch ein Pixel auf dem Bildsensor abgebildet wird. Die GSD ist entscheidend für die Bestimmung der Auflösung und Detailgenauigkeit von Luftbildaufnahmen und wird durch eine Kombination von Kameraeigenschaften und Flugparametern bestimmt.

Die GSD wird oft in Metern pro Pixel (m/pixel) angegeben und gibt an, wie viel Bodenfläche ein einzelnes Pixel auf dem Bildsensor repräsentiert. Eine kleinere GSD bedeutet eine höhere Auflösung, was zu detaillierteren Abbildungen führt. Die Berechnung der GSD berücksichtigt mehrere Parameter:

- Flughöhe (H): Die Höhe über dem Boden, in der die Kamera sich befindet.
- Brennweite (f): Die Brennweite des Objektivs, die den Blickwinkel und die Vergrößerung bestimmt.
- Sensorgröße (Sw): Die physische Breite des Bildsensors in Millimetern.

- Bildauflösung (P_w): Die Anzahl der Pixel in der Breite des Bildes.

Die GSD kann horizontal und vertikal berechnet werden (*Leachtenauer und Driggers, 2001*, S. 30 ff.):

$$GSD = \frac{H * S_w}{f * P_w}. \quad (2.1)$$

$$GSD = \frac{H * S_h}{f * P_h}. \quad (2.2)$$

Mit:

- Flughöhe über Grund (H)
- Breite des Sensors in Millimetern (S_w)
- Höhe des Sensors in Millimetern (S_h)
- Brennweite des Objektivs in Millimetern (f)
- Anzahl der Pixel in der Bildbreite (P_w)
- Anzahl der Pixel in der Bildhöhe (P_h)

Um die Beziehung zwischen der GSD und der tatsächlichen Abbildung zu verstehen, betrachten wir eine vereinfachte Skizze:

Das Objektiv projiziert ein Bild auf den Sensor. Die Brennweite ist hierbei der Abstand des optischen Zentrums zum Sensor, auf welchem einzelne Sensorpixel die Photonen aufnehmen und in digitale Signale übersetzen. Jedes Pixel deckt dabei eine bestimmte Bodenfläche ab. Die Größe des auf die Bodenfläche projizierten Sensorpixels entspricht der GSD.

Der Pixelversatz oder -pitch p ist die physische Größe eines Pixels auf dem Sensor. Dieser Wert ist wichtig, um die GSD in Bezug zur Sensorgröße und Bildauflösung zu setzen. Er kann je nach Pixelgeometrie auf dem Chip in horizontaler und vertikaler Richtung variieren, ist jedoch bei vielen modernen Sensoren in beide Richtungen gleich:

$$p = \frac{S_w}{P_w}. \quad (2.3)$$

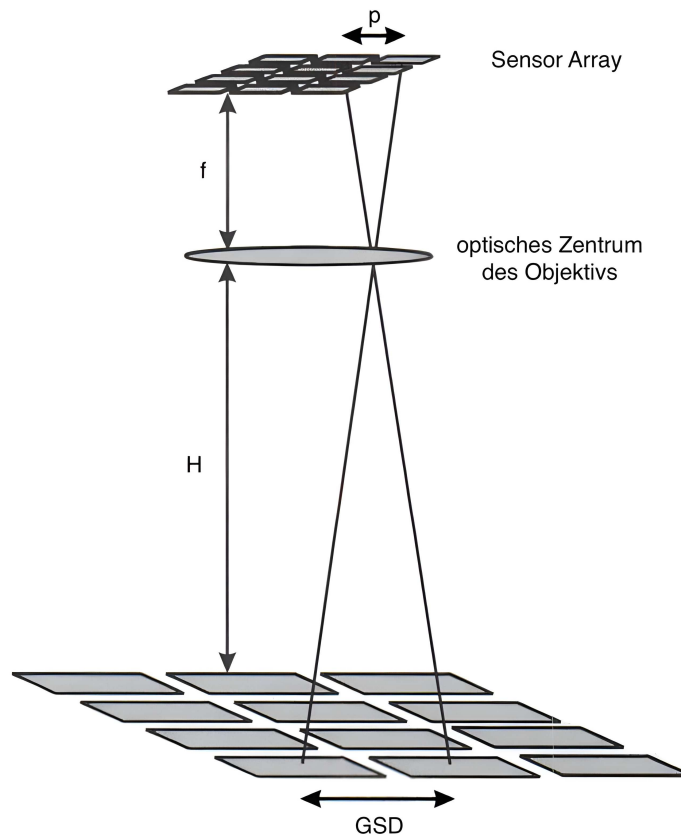


ABB. 2.8: Ground Sampling Distance (GSD) abhängig von Flughöhe, Brennweite und Sensorpitch. Angelehnt an *Leachtenauer und Driggers (2001, S. 31)*

$$p = \frac{S_h}{P_h}. \quad (2.4)$$

Dieser Pitch ist jedoch nicht direkt in der GSD-Formel enthalten, da die GSD die Bodenaufösung beschreibt, nicht die physische Pixelgröße auf dem Sensor. Der Pitch hilft jedoch, die Beziehung zwischen Sensorgröße und Bildauflösung zu verstehen, was indirekt die GSD beeinflusst.

Da die Ground Sample Distance (GSD) direkt proportional von der Flughöhe abhängt, ergeben sich je nach für den Analysezweck geforderter Auflösung Anforderungen an die maximale Höhe über Grund der Trajektorie des Luftfahrzeuges.

Die GSD kann grundsätzlich ebenso durch eine größere Brennweite der Optik und die daraus folgende Verringerung des Strahlöffnungswinkels erhöht werden, da hierdurch ein kleinerer Bildausschnitt auf die gegebene Sensorfläche projiziert wird. Dies wiederum führt jedoch zu einer stärkeren Anfälligkeit gegenüber Bewegungsunschärfe, da sich das Luftfahrzeug während der erforderlichen Belichtungszeit um mehr als eine GSD weiterbewegt und die gemessenen Photonen somit über

mehrere Pixel verschmiert. Somit ergeben sich hieraus Limitationen hinsichtlich der maximalen Fluggeschwindigkeit, was wiederum die Befliegungsproduktivität einschränkt.

Entgegengewirkt werden kann dem, indem eine größere Sensorfläche verwendet und somit die Lichtempfindlichkeit erhöht wird. Hierdurch kann die erforderliche Belichtungszeit herabgesetzt werden, was wiederum höhere Fluggeschwindigkeiten ermöglicht. Größere (Kamera-) Sensoren sowie lichtstärkere Optiken mit längeren Brennweiten brachten jedoch (besonders in der Vergangenheit) höhere Anforderungen an Bauraum und Nutzlastmasse mit sich, was wiederum leistungsfähigere und größere Luftfahrzeuge notwendig macht.

Bewegungsunschärfe in der Fotografie und speziell in der Luftbildfotografie ist ein Phänomen, das durch die Bewegung von Objekt oder Kamera während der Belichtung entsteht. Diese Unschärfe resultiert aus der relativen Bewegung zwischen dem aufgenommenen Objekt und dem Bildsensor während der Aufnahmezeit, was in der Bildgebung als Unschärfe erscheint.

Die Bewegungsunschärfe wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, hauptsächlich durch die Belichtungszeit und die Geschwindigkeit der Bewegung. Die Belichtungszeit, definiert als die Dauer, für die der Sensor Licht empfängt, ist entscheidend. Eine längere Belichtungszeit erhöht die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß der Bewegungsunschärfe, da sich das Objekt oder die Kamera über einen längeren Zeitraum bewegen kann.

Die Berechnung der Bewegungsunschärfe erfolgt durch Multiplikation der Geschwindigkeit der Bewegung (in Meter pro Sekunde, m/s) mit der Belichtungszeit (in Sekunden, s). Zum Beispiel, bei einer Fluggeschwindigkeit von 30 m/s und einer Belichtungszeit von 1/1000 Sekunde, ergibt sich eine Bewegungsunschärfe von:

$$\text{Bewegungsunschärfe } \Delta x = \text{Geschwindigkeit} \times \text{Belichtungszeit} \quad (2.5)$$

$$= 30 \text{ m/s} \times \frac{1}{1000} \text{ s} \quad (2.6)$$

$$= 0.03 \text{ m} \quad (2.7)$$

$$= 3 \text{ cm} \quad (2.8)$$

Dies bedeutet, dass die Bewegungsunschärfe in diesem Fall etwa 3 cm beträgt, was in der Bildgebung als Unschärfe erscheint.

Zur Minimierung der Bewegungsunschärfe können verschiedene Methoden angewendet werden. Eine der effektivsten ist die Reduktion der Belichtungszeit, was die

Zeitspanne, in der Bewegung zur Unschärfe führen kann, verkürzt. Zusätzlich können Stabilisierungssysteme, sowohl mechanische als auch elektronische, eingesetzt werden, um die Kamera während der Aufnahme zu stabilisieren. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung schnellerer Objektive, die bei gleichen Lichtverhältnissen kürzere Belichtungszeiten ermöglichen.

Die Bewältigung der Bewegungsunschärfe erfordert somit ein Gleichgewicht zwischen der Notwendigkeit, genügend Licht für eine gute Belichtung zu erfassen, und der Notwendigkeit, Bewegung je Aufnahmezeit zu minimieren. Durch das Verständnis und die Berechnung dieser Unschärfe können Fotografen und Kartografen ihre Aufnahmen optimieren, um die gewünschte Schärfe zu erreichen.

Beispielhaft für eine iXM-RS280 Großformatkamera *Phase One* (2022) gibt der Hersteller Phase One wie in Abbildung 2.1 dargestellt quantitative Zusammenhänge zwischen Flughöhe und damit korrelierender GSD, Belichtungszeit und der daraus resultierenden maximalen Fluggeschwindigkeit an. Hierbei handelt es sich um ein vergleichsweise leistungsfähiges und hochpreisiges Modell, welches in der Regel auf bemannten Flugzeugen eingesetzt wird, welches durch die hohen Fluggeschwindigkeiten allerdings auch eine hohe Befliegungsproduktivität erreicht.

Belichtungszeit	GSD = 10 cm H = 7.853 ft	GSD = 20 cm H = 15.706 ft	GSD = 30 cm 23.559 ft	GSD = 40 cm H = 31.412 ft
<i>sec</i>	<i>knot</i>	<i>knot</i>	<i>knot</i>	<i>knot</i>
1/2000	194	388	583	777
1/1600	155	311	466	622
1/1250	121	243	364	486
1/1000	97	194	291	388
1/800	77	155	233	311

TAB. 2.1: Maximale Fluggeschwindigkeit bei Nutzung einer Phase One iXM-RS280F Kamera in Abhängigkeit von Flughöhe, GSD, Belichtungszeit und der daraus resultierenden maximalen Fluggeschwindigkeit (*PhaseOne*, 2022)

Für kleinere Drohnen werden aber typischerweise kompaktere Kameras eingesetzt. Im Folgenden seien einmal beispielhaft erzielbare GSD-Auflösungen üblicher Modelle dargestellt und verglichen unter den Annahmen von

- 100 m Spurbreite der Aufnahme
- 100 km/h ground speed
- 60% longitudinaler Überlappung der Bilder
- 1/2500 s Belichtungszeit

Während durch die richtige Kombination von Flughöhe und Brennweite innerhalb eines gewissen Bereiches vergleichbare GSD-Auflösungen zu erreichen sind, ist die

TAB. 2.2: Statische GSD-Auflösung und (Brennweite) nach Flughöhe (Herstellerangaben)

Flughöhe	100 m	250 m
Sony A7R4 (60MP)	1,07 cm (35 mm)	1,11 cm (85 mm)
Zenmuse P1 (45MP)	1,26 cm (35 mm)	1,88 cm (50 mm)
Phase One iXM 50 (50MP)	1,32 cm (40 mm)	1,20 cm (110 mm)
Phase One iXM 100 (100MP)	0,94 cm (40 mm)	0,85 cm (110 mm)
Phase One iXM-RS150 (150MP)	0,75 cm (50 mm)	0,85 cm (110 mm)

zu erwartende Qualität der Luftbildaufnahmen nur auf den ersten Blick nahezu identisch. Einerseits nimmt mit längeren Brennweiten für gewöhnlich die Lichtstärke des Objektivs ab, da nur das Licht eines kleineren Winkelausschnittes eingefangen werden kann.² Dies führt dazu, dass abhängig von den Lichtverhältnissen längere Belichtungszeiten notwendig werden, was sich wiederum negativ auf die Bewegungsunschärfe auswirkt. Steigt die benötigte Belichtungszeit beispielsweise von 1/2500 s auf 1/500 s an, so steigt bei einer Phase One iXM 50 die durch die während der Belichtungszeit durch die Bewegung des Luftfahrzeuges verursachte Bewegungsunschärfe in Flugrichtung von $n = 0,92$ auf $n = 4,2$ Pixel an, was einer ground distance von 1,1 bzw. 5,55 cm entspricht.

$$x_{2500} = 100 \frac{km}{h} * \frac{1}{2500} s = 0,011m = 1,1cm \quad (2.9)$$

$$n_{2500} = \frac{1,1cm}{1,2cm} = 0,92px \quad (2.10)$$

$$x_{500} = 100 \frac{km}{h} * \frac{1}{500} s = 0,056m = 5,6cm \quad (2.11)$$

$$n_{500} = \frac{5,6cm}{1,32cm} = 4,2px \quad (2.12)$$

²In begrenztem Umfang kann dies kompensiert werden durch eine größere Objektivöffnung und die dadurch erzielte stärkere Kanalisierung der einfallenden Lichtmenge.

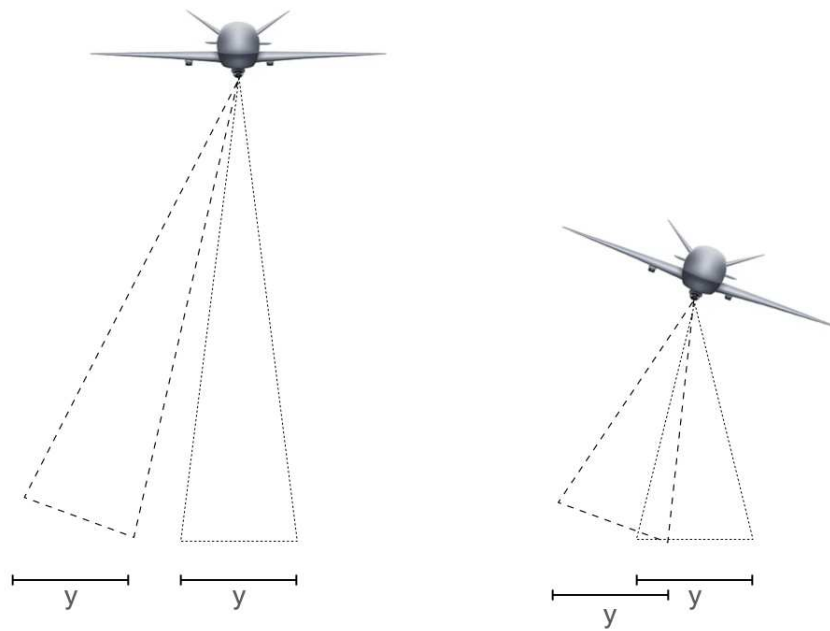


ABB. 2.9: Einfluss des Rollwinkels auf die Projektionsflächenverschiebung in Abhängigkeit von Flughöhe und korrespondierender Brennweite

Übersteigt die Bewegungsunschärfe 1 Pixel bzw. die angestrebte GSD signifikant, kann letztere nicht mehr erzielt werden, da keine individuellen Informationen über einzelne Pixel mehr gesammelt werden können.³ Dem Anstieg der Bewegungsunschärfe kann bis zu einem gewissen Grad mit einer Verringerung der Fluggeschwindigkeit entgegengewirkt werden, was jedoch mit erheblichen Einbußen bei der Befliegungsleistung einhergeht. Im aufgezeigten Beispiel müsste die Cruise Geschwindigkeit auf unter 25 km/h reduziert werden, um einen Anstieg der Bewegungsunschärfe zu kompensieren, was rein flugphysikalisch bereits unrealistisch ist.

Des Weiteren wirken sich durch Vibration oder durch Windböen induzierte Roll- und Gierwinkel verursachte Störungen bei längeren Brennweiten und größeren Flughöhen deutlich stärker aus, da eine gegebene Veränderungen des Strahleinfallswinkels bzw. Rollwinkels θ die Projektionsfläche wie in Abbildung 2.9 dargestellt um einen deutlich höheren Relativanteil bzw. eine größere Anzahl an Pixeln verschiebt als dies bei weitwinkligeren Objektiven der Fall wäre. So entstehen einerseits Bewegungsunschärfen in lateraler y -Richtung, andererseits muss die laterale Ausrichtung der Projektionsfläche gegebenenfalls durch einen (schnelleren) Gimbal korrigiert werden, um die Zielinfrastruktur im Bild(-Mittelpunkt) zu behalten.

³Durch algorithmisches Post-Processing können Bewegungsunschärfefehler in gewissen Umfang teilweise wieder korrigiert werden, indem die Messwerte benachbarter Pixel über Differenzwerte auf den ursprünglichen Pixel zurückprojiziert werden. Dies würde jedoch an dieser Stelle zu weit führen.

2.3 Fernerkundung durch Erdbeobachtungssatelliten

Satelliten sind die mitunter verbreitetste Methode der Fernerkundung, da aus dem All große Flächen schnell überflogen und vermessen werden können. Je nach Spezialisierung nutzen diese dabei das volle elektromagnetische Spektrum wie in Kapitel 2.1 dargestellt sowohl in aktiver wie auch passiver Variante (*Emery und Camps, 2017; Li, 2021; Lu et al., 2020*). Sogar aktive Sensoren wie das Differential Absorption LIDAR kommen bei der Gasquantifizierung der Atmosphäre zum Einsatz *Browell et al. (1998)*. Die Liste an Anwendungszwecken ist nahezu unerschöpflich und kann hier nicht abschließend dargestellt werden. Beispielhaft seien die Messung von Meerestemperaturen, Waldbestand, Wasser- und Stickstoffgehalt landwirtschaftlicher Böden und allgemeine Art der Landnutzung (*Emery und Camps, 2017*) genannt sowie in Tabelle 2.3 Anwendungsfelder für SAR Satellitendaten dargestellt - ein vergleichsweise neues Feld der Satellitenfernerkundung (*Moreira et al., 2013, S. 37*).

TAB. 2.3: Anwendungsbereiche für SAR-Satellitendaten (*Moreira et al., 2013, S. 37*)

Land	Vegetation	Ozean	Schnee und Eis
Mehrzweckbildgebung	Vegetationstyp	Mehrzweckozean-	Eisüberdeckung
Bodentyp	Waldbiomasse	überwachung	Eismächtigkeit
Landbedeckung	Biodiversität	Wellengang	Meereseistyp
Landnutzung	Waldprofil	Meeresströmungen	Eisberge
Topographie	Waldhöhe	oberflächennahe	Optimierung
Wasserstände	Branderkennung	Winde	von Schiffsrou-
Bodenabsenkungen	Ernteklassifizierung,	Bathymetrie	ten
Erosion	-höhe, -biomasse	Wellenhöhe	Schneebedeckung
Erdbebenmonitoring	Entwaldung	Wellenlänge	Schnee-
Vulkanmonitoring	Waldzustand	Wellenrichtung	schmelzstatus
Katastrophenschutz		Ölteppiche	(trocken / nass)
Coherent Change De-		Schiffsüberwachung	Schneewasser-
tection			äquivalent
Stadtplanung			Gletscher-
Verkehrszählung			vermessung
Bodenfeuchtigkeit			
Permafrostmonitoring			

Von besonderer Bedeutung für das Verständnis der Fähigkeiten und Limitationen der Satellitenfernkundung ist das Thema Orbitalmechanik, wie es *Emery und Camps (2017)* in Kapitel 7 sowie *Chuvieco (2020, S. 83)* darlegen. Das Orbit Design in Kombination mit dem verwendeten Sensor definiert weitestgehend die Qualität der erzielbaren Daten und bestimmt daher, inwieweit eine Satellitenmission in der Lage ist Nutzeranforderungen zu erfüllen.

Als Orbits insbesondere für höher auflösende Erdbeobachtungssatelliten solche im sogenannten Low Earth Orbit (LEO) gewählt, welcher sich von 150 km bis circa (ca.) 2.000 km Höhe erstreckt. Dieser bietet anders als die weiter entfernten Orbitkategorien Medium Earth Orbit (MEO) (2.000 bis < 36.000 km) und Geostationary Earth Orbit (GEO) (36.000 km) den Vorteil, dass sich die Satelliten noch wesentlich näher am Beobachtungsobjekt befinden und Sensoren somit höhere Auflösungen erzielen können. MEO und GEO Orbits bieten hingegen auf Grund des größeren Sichtfeldes allerdings den Vorteil eines persistenten Monitorings, sozusagen ein live-feed der Erdoberfläche (wenn auch in geringerer Auflösung) und werden deshalb häufig für militärische Fernerkundungszwecke neben hochauflösenden LEO-Systemen im Portfolio ergänzt. Neben der Orbithöhe und Exzentrizität⁴ ist das wichtigste Unterscheidungsmerkmal von LEO Orbits deren Inklination, also der Winkel zwischen der Bahnebene und der Äquatorialebene. Diese gibt einerseits vor, zwischen welchen Breitengraden der Satellit sich bewegt. Andererseits hat die Inklination Einfluss auf ein Phänomen namens Präzession, welches verursacht wird durch die nicht ganz kugelförmige Form der Erde: So ist der Erddurchmesser und damit die Fallbeschleunigung am Äquator geringfügig höher als an den Polen. Dadurch wird der Orbit um die Erdachse "herumgezogen", das heißt mit jedem Überflug verschiebt sich ein beliebiger Überflugpunkt entlang des Längengrades zusätzlich zur unter sich stattfindenden Erdrotation. Dieser Effekt wird in sogenannten sonnensynchronen Orbits ([Boain, 2004](#)) genutzt, bei welchen die Präzessionsgeschwindigkeit genau der Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne entspricht und somit jahreszeitenunabhängig jeder Punkt auf der Nadirlinie unterhalb des Orbits zur selben Tageszeit überflogen wird und somit die gleichen Belichtungsbedingungen durch die Sonne herrschen.

Da Satelliten keinerlei Auftriebshilfen besitzen, sondern lediglich durch die Zentripetalkraft der Erdgravitation in einem stabilen Orbit gehalten wird, ist es im regelmäßigen Betrieb nicht möglich, seine Flugbahn zu ändern und etwa auf kurzfristige Anfrage bestimmte Orte zu bestimmten Zeiten zu überfliegen. Ein Antrieb wird während des Betriebes in der Regel nur verwendet um die Geschwindigkeitsverluste durch Luftwiderstand in der dünnen Restatmosphäre des Orbits auszugleichen sowie kleinere Ausweichmanöver zur Vermeidung anderer Objekte vorzunehmen. Lediglich die Ausrichtung des Satelliten mit seiner Sensorik ist auf Nachfrage regelmäßig steuerbar. Da die meisten Erdbeobachtungssatelliten, insbesondere höher auflösende Sensoren mit einem kleineren Öffnungswinkel, bei jedem Überflug jeweils nur einen Teil des theoretisch erreichbaren Sichtfeldes erfassen, ist lediglich innerhalb der Grenzen der Sensorausrichtung das Anfordern einer on-demand Aufnahme möglich.

⁴Abweichung von einer ideal runden Kreisbahn

Relevant für bestimmte Anwendungsfälle sind vor diesem Hintergrund die sogenannten Revisit Times, also regelmäßige Zeitabstände, in denen eine Satellitenmission den gewünschten Beobachtungspunkt wiederholt überfliegt und somit erneut erfassen kann. Insbesondere zur Erkennung von Veränderungen im Zeitverlauf sowie der zeitnahen Meldung eines Ereignisses, wie beispielsweise dem Ausbruch eines Feuers, sind möglichst kurze Revisit Times mitunter erforderlich. Revisit Times bestimmen sich aus dem Orbitdesign und der Anzahl an Satelliten in einer Konstellation, die üblicherweise in regelmäßigen Abständen bzw. Längengradversatz zueinander die Erde überfliegen und somit semi-regelmäßige Aufnahmeabstände erzielen. Das Orbitdesign ermöglicht es durch Kombination unterschiedlicher Orbitarten⁵ in einer Konstellation, sodass Datenaquisekapazität über stark nachgefragten Regionen erhöht und Revisit Times reduziert werden können. Dies ist für Anwendungen von Bedeutung, welche entweder eine Datenerhebung in regelmäßigen, kurzen Abständen erfordern oder aber on demand eine Erfordernis zur kurzfristigen Datenerhebung entsteht. Die Revisit Time bestimmt so die maximale Wartedauer bis zur Erhebung des nächsten Datensatzes über einem Ort.

Aktuelle Satellitenmissionen, welche kürzlich gestartet wurden, werden in Tabelle 2.4 dargestellt. Es zeigt sich, dass insbesondere neue Missionen deutlich verbesserte GSD-Auflösungen sowie Revisit Times aufweisen. Verbesserte und insbesondere miniaturisierte Sensoren ermöglichen es laut *Emery und Camps (2017, S. 797-810)*, wesentlich kleinere Satelliten zu geringeren Stückkosten zu bauen und somit Konstellationen bestehend aus vielen Einzelsatelliten aufzubauen, welche dadurch erhöhte Datenaquisekapazität und verminderte Revisit Times erreichen.

TAB. 2.4: Spezifikationen ausgewählter aktueller Satellitenkonstellationen zur Erdbeobachtung (Hersteller- / Betreiberangaben)

Konstellation	Sensortyp	GSD	Revisit Time	Latenz
Planet Labs - Pelican (ab 2023)	Optisch	30 cm	48 - 144 min	5 min
Planet Labs - SkySat (ab 2013)	Optisch	50 cm	ca. 4 h	N/A
MAXAR - World View Legion (ab 2022)	Optisch	30 cm	ca. 100 min	N/A
ICEYE (from 2019)	SAR	25 - 100 cm	< 24 h	12 h
Blacksky Global (ab 2022)	Optisch	50 cm	5 - 90 min	N/A

Im Bereich der Topographievermessung zur Erstellung von Höhenprofilen erreichen moderne Missionen wie das 3D Elevation Program (3DEP) LIDAR des National

⁵Prograde (das heißt (d.h.) in Richtung der Erdrotation verlaufende) Orbits mit ca. 53° Inklination haben eine erhöhte Verweildauer über den am dichtest besiedelten Breitengraden der nördlichen Hemisphäre, müssen aber um Sonnensynchrone und/oder polare Orbits ergänzt werden, um Breitengrade jenseits ihrer Inklination abdecken zu können.

Geodetic Survey (NGS) laut *Callahan und Berber* (2022) und *Stoker und Miller* (2022) vertikale Genauigkeiten zwischen 15 cm und 20 cm.

Im Kontext zeitkritischer Beobachtungsdaten spielen je nach Sensor zusätzliche limitierende Randbedingungen eine Rolle. Insbesondere optische Satelliten im visuellen sowie infraroten Spektralbereich sind von atmosphärischen Interaktionen wie Absorption und Streuung durch Gase und Aerosole in ihrer Datenqualität beeinträchtigt (*Chuvienco, 2020*, S. 53 fff.). Offensichtlichstes und je nach Ort mitunter sehr häufiges Beispiel ist Verdeckung durch eine dichte Wolkendecke, welche Beobachtungen zeitweise unmöglich macht bis sich die Wetterverhältnisse verändern. SAR-Satelliten hingegen sind hiervon nicht betroffen und können witterungsunabhängig Wolkendecken durchdringen *Emery und Camps* (2017, S. 131-290). Des Weiteren sind sie auch nicht von natürlicher Beleuchtung durch die Sonne abhängig und können als aktive Sensoren Aufnahmen auch auf der Nachtseite des Planeten anfertigen.

Ein weiterer bedeutender Faktor bei der Beurteilung von Satellitenaufnahmen als Datenquelle ist deren Preis. Historisch begründet nehmen viele Kunden Satellitenaufnahmen als hochpreisig wahr. Eine solche Verallgemeinerung greift jedoch zu kurz, denn, wie *Chuvienco* (2020, S. 114 f.) ausführt, hängt der Preis signifikant von der Aktualität der benötigten Daten ab: Aktuellere Daten sind meist erheblich teurer, da sie häufig wertvolle dedizierte Datenaquisekapazität eines Satelliten in Anspruch nehmen anstatt die Daten aus einem vorrätigem Datenbankbestand zu beziehen. Ein zweiter wichtiger Faktor für das Preisniveau ist die benötigte Auflösung (GSD). Höher auflösende Sensoren sind grundsätzlich teurer hinsichtlich verwendeter Hardware, andererseits geht eine höhere Auflösung in der Regel einher mit vermindertem Sensoröffnungswinkel und damit kleinerem Sichtfeld, was sich wiederum negativ auf die Datenaquisekapazität (km^2 je Zeit bzw. Überflug) des Satelliten auswirkt und die Kosten nach oben treibt. Zudem sind Preise für Satellitendaten auf Grund einer hohen Innovationsgeschwindigkeit der “new space economy” einer stark degressiven Dynamik unterworfen. Abbildung 2.10 gibt in Anlehnung an *Chuvienco* (2020) dennoch eine Indikation für das Preisniveau wie es ca. im Jahr 2020 herrschte⁶.

Dieses Preisniveau ist konsistent mit Informationen von *LANDinfo - World Wide Mapping LLC* (2018), einem Zwischenhändler für Satellitendaten unterschiedlicher Satellitensysteme. Wie in Abbildungen 2.11 und 2.12 ersichtlich, bestätigt sich auch der Preisunterschied zwischen Archivdaten gegenüber neu angeforderten Aufnahmen, welche am Beispiel von WorldView-1 mit $14\$/km^2$ bzw. $24\$/km^2$ für 50 cm GSD sowie $19\$/km^2$ bzw. $29\$/km^2$ für 30 cm GSD zu Buche schlugen.

⁶Für nicht kommerzielle (akademische) Akteure ist es äußerst schwierig, an repräsentative und aktuelle Preisdaten zu gelangen, da diese dem Betriebsgeheimnis unterliegen und oft in

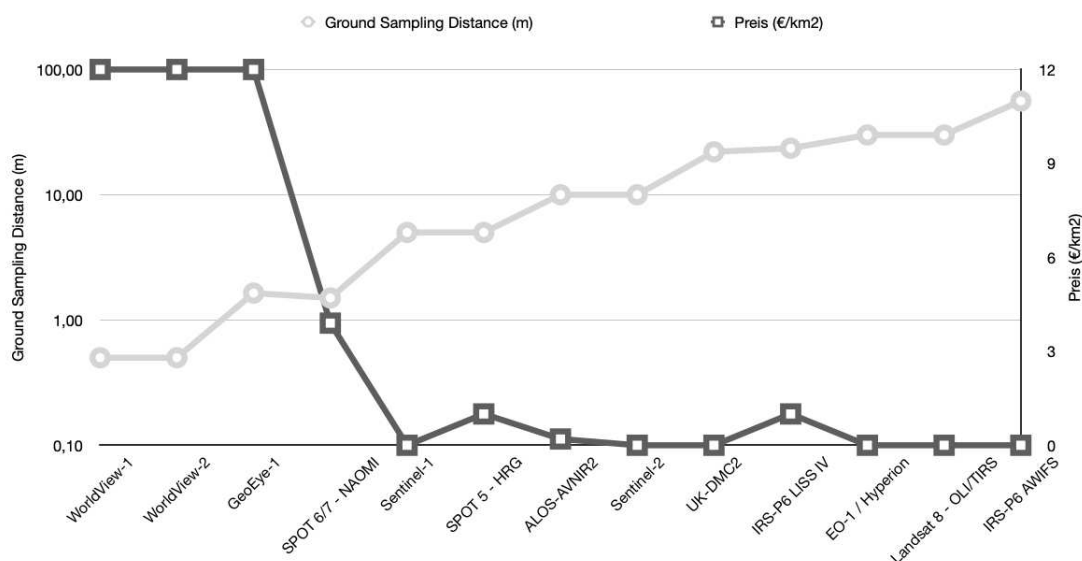


ABB. 2.10: Indikation für das Preisniveau von Satellitendaten im Jahr 2020, angelehnt an [Chuvieco \(2020, S. 115\)](#)

Neuere Preisinformationen des Unternehmens liveEO, eines etablierten Startups der "new space economy", dessen Tätigkeitsbereich im Handel und der Analyse von Satellitendaten liegt, legen ein deutlich niedrigeres Preisniveau nahe. Demnach sind Daten aus neuem Satellitentasking für eine 4 Bänder (inklusive (inkl.) nahem Infrarot) bei einer optischen Auflösung von 30 cm für unter 10 €/km² zu bekommen, während Archivdaten bereits für unter einem 1 €/km² gehandelt werden. Auf Grund der Reputation des Akteurs werden diese Preisangaben als äußerst glaubhaft eingeschätzt.

Von Bedeutung insbesondere für dünne, langgestreckte Infrastrukturgeometrien ist weiterhin die Geometrie sowie die Mindestfläche, die beschafft werden muss, da gegebenenfalls (ggf.) erhebliche Kosten für eigentlich nicht benötigte Flächen-daten entstehen. So stellt LandInfo die Anforderung, dass bei neuem Satellitentasking eine Streifenbreite von mindestens 5 km beschafft werden muss, während für Archivdaten eine Mindestbreite von 2 km ausreicht. LiveEO hingegen bietet Streifenbreiten von lediglich 1 km an, was für die in dieser Arbeit betrachteten Infrastrukturen völlig ausreicht.

Nach Abwägung der zur Verfügung stehenden Quellen für Kosten von Satellitendaten, wird das Angebot von liveEO und Wettbewerbern des New Space Sektors als am wettbewerbsfähigsten eingestuft. Daher wird zum Zwecke der Kostenbewertung dieser Arbeit eine Streifenbreite von 1 km bei Flächendatenkosten von 10

individuellen Angeboten erstellt werden sowie anbieterabhängig stark von Preissetzungsstrategien für individuelle Kunden beeinflusst werden, in welchen Fixkosten sowie deren Umlage die dominierende Rolle spielen.

High Resolution Archive Pricing (50cm)	WorldView-1	WorldView-2/3	QuickBird (60cm)	GE-1/WV-4	IKONOS (80cm)	Pleiades 1A/1B
Panchromatic	\$14.00	\$14.00	\$14.00	\$14.00	\$10	\$12.50
3-Band Pan-Sharpener	n/a	\$17.50	\$17.50	\$17.50	\$10	\$12.50
4-Band Pan-Sharpener	n/a	\$17.50	\$17.50	\$17.50	\$10	\$12.50
Panchromatic + 4-band Multispectral Bundle	n/a	\$17.50	\$17.50	\$17.50	\$10	\$12.50
8-Band Multispectral	n/a	\$19	n/a	n/a	n/a	n/a
8-Band Panchromatic + Multispectral Bundle	n/a	\$19	n/a	n/a	n/a	n/a

*The minimum order area for archive imagery, for all sensors, is 25 sq. km with a 2km minimum order width

To receive archive pricing, QB,WV2,WV1, GE1 & IK imagery has to be **older than 90 days in archive. No hold on Pleiades imagery.

***Airbus default licensing is for 1-5 users; DigitalGlobe default licensing is single user -- pricing uplifts apply for additional users.

High Resolution New Tasking Pricing (50cm)	WorldView-1	WorldView-2/3	QuickBird	GE-1/WV-4	IKONOS (80cm)	Pleiades 1A/1B
Panchromatic	\$24	\$24	n/a	\$24	n/a	\$21.25*
3-Band Pan-Sharpener	n/a	\$27.50	n/a	\$27.50	n/a	\$21.25*
4-Band Pan-Sharpener	n/a	\$27.50	n/a	\$27.50	n/a	\$21.25*
Panchromatic + 4-band Multispectral Bundle	n/a	\$27.50	n/a	\$27.50	n/a	\$21.25*
8-Band Multispectral	n/a	\$29.00	n/a	n/a	n/a	n/a
8-Band Panchromatic + Multispectral Bundle	n/a	\$29.00	n/a	n/a	n/a	n/a

*The minimum order area for new tasking collections, for all sensors, is 100 sq. km with a 5km minimum order width. Challenging uplift may apply on Pleiades.

**On DigitalGlobe satellites 5% or less cloud cover guarantee is available for \$20 per km2 uplift, 10% or less guarantee is \$10 per km2 uplift. WV-3 specific new collects = 30cm pricing

***Pleiades 5% or less cloud cover guarantee is \$10 per sq. km.

**** 0-15 degree Off-Nadir may be specified for an additional \$2 per sq. km

*****Airbus default licensing is for 1-5 users; DigitalGlobe default licensing is single user -- pricing uplifts apply for additional users.

ABB. 2.11: Preisliste für Satellitendaten aus dem Jahr 2018 (LANDinfo - World Wide Mapping LLC, 2018)

WV2, WV3, WV4 & GE1 Archive km2 Price List				
Resolution	30cm	50cm	30cm Stereo	50cm Stereo
Panchromatic	\$19.00	\$14.00	\$38.00	\$28.00
3/4 Band Pan-Sharpended or Pan + MS Bundle	\$22.50	\$17.50	\$45.00	\$35.00
8-Band Panchromatic + Multispectral Bundle	\$24.00	\$19.00	\$48.00	\$38.00

WV2, WV3, WV4 & GE1 New Tasking/Fresh Archive km2 Price List				
Resolution	30cm	50cm	30cm Stereo	50cm Stereo
Panchromatic	\$29.00	\$24.00	\$58.00	\$48.00
3/4 Band Pan-Sharpended or Pan + MS Bundle	\$32.50	\$27.50	\$65.00	\$55.00
8-Band Panchromatic + Multispectral Bundle	\$34.00	\$29.00	\$68.00	\$58.00

Minimum Archive Order 25km ²
Minimum Tasking Order 100km ²

ABB. 2.12: Preisliste für Satellitendaten aus dem Jahr 2022 (nicht öffentliche Preisangebote)

€/km² für ein Neutasking des Satelliten angenommen. Neutasking wird als Annahme deswegen als notwendig angesehen, um eine Vergleichbarkeit in der on-demand Beschaffung von Fernerkundungsdaten zu drohnenbasierten Luftbilddaufnahmen zu gewährleisten. Dies resultiert in Datenakquisitionskosten von 10 € je Kilometer Infrastruktur. Zusätzlich wird für weniger zeitkritische Inspektionsaufgaben die Kostenbasis für Archivdaten je Kilometer Infrastrukturlänge mit 1€ veranschlagt.

2.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel schuf einen grundsätzlichen Überblick zu Fernerkundungsmethoden, deren prinzipielle Funktionsweise und wozu sie gemeinhin verwendet werden können. Tabelle 2.5 stellt diese mit den wichtigsten Eigenschaften dar.

Das folgende Kapitel stellt die Methoden in den konkreten Kontext einer luftgestützten Fernerkundung von in dieser Arbeit betrachteten Infrastrukturen und arbeitet die konkrete Eignung einzelner Methoden für bestimmte Anwendungsfälle heraus.

TAB. 2.5: Übersicht physikalischer Prinzipien zur Fernerkundung

Bezeichnung	Wellenlänge	Aktiv/Passiv	Hauptanwendung
Thermalkamera	Infrarot	Passiv	Objekterkennung, Wärmequellen
Optisch-visuelle Kamera	visueller Spektralbereich	Passiv	Objekterkennung, Oberflächenbeschaffenheit
UV-Kamera	UV Spektralbereich	Passiv	elektrische Felder als UV Quelle
LIDAR	250nm bis 11 μ m	Aktiv	Objekterkennung, Geometrievermessung
DIAL	individuelles Absorbtionspektralband	Aktiv	Spurengase
Radar & SAR	Mikro- und Radiowellen	Aktiv	Objekterkennung, Geometrievermessung

3. Energieinfrastrukturen und Inspektionsanforderungen

Im folgenden Kapitel werden beispielhaft drei weitläufige Infrastrukturen beschrieben, deren Betreiber als Ankerkunden eines drohnenbasierten Langstreckeninspektionssystems dienen könnten. Im Vordergrund der Auswahl steht dabei eine große geographische Ausdehnung, welche eine Inspektion vom Boden aus erheblich herausfordernder und aufwändiger macht. Entscheidend für eine fliegende Trägerplattform in diesem Kontext ist demnach die Fähigkeit, während der Datenerfassung große Distanzen schnell und kostengünstig zurücklegen zu können.

3.1 Stromnetze

3.1.1 Infrastrukturtopologie

Stromnetzsysteme bilden das Rückgrat eines jeden nationalen Energiesystemes und dienen der Übertragung elektrischer Energie von den Erzeugern hin zu den Verbrauchern. Sie sind im Allgemeinen hierarchisch aufgebaut und weisen mehrere Netzebenen unterschiedlicher Spannungsniveaus auf, welche sich international unterscheiden (*Amin und Stringer, 2008; Beyer, 2018*). Abbildung 3.1 zeigt dabei Höchstspannungsnetz für Deutschland, welche dem überregionalen Transport von Energie dienen.

Abbildung 3.2 des deutschen *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022)* unterteilt das Netzsystem zunächst in das Übertragungsnetz, welches dem überregionalen Transport von Energie im Höchstspannungsbereich (in Deutschland 220 kV oder 380 kV) dient, und in das Verteilnetz. Die Aufgabe des Letzteren ist die regionale Verteilung und wird wiederum in drei weitere Netzebenen untergliedert. Diese werden als Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene bezeichnet und weisen in Deutschland üblicherweise Spannungsniveaus von 110 kV für die Hoch-, 10 kV oder 20 kV in die Mittelspannung und 400 V in der Niederspannung auf.

Erzeuger und Verbraucher sind je nach benötigter Leistung an einer für sie geeigneten Spannungsebene angeschlossen. Großkraftwerke wie Offshore Wind-, Kohle-,



ABB. 3.1: Höchstspannungsnetzkarte Deutschland (*Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.*, 2020)

Kern- oder Wasserkraftwerke sind meist direkt mit der Höchstspannung des Übertragungsnetzes verbunden. Etwas kleinere Gaskraftwerke, sowie Onshore Windparks und Freiflächensolarparks und Großbatteriespeicher sind typischerweise je nach Größe mit der 110 kV Hoch- oder 10-20 kV Mittelspannung verbunden. Die Hoch- und Mittelspannung versorgt verbraucherseitig auch die meisten Industrieanlagen. Kleinere Gewerbeverbraucher und normale Haushalte werden wiederum aus der Niederspannung mit 400 V bedient, ebenso wie kleine erneuerbare Erzeugungsanlagen wie Dachsolaranlagen im Bereich <100 kWp - <200 kWp.

Mit Ausnahme einiger weniger Höchstspannungsleitungen zum großskaligen Transport elektrischer Energie über sehr weite Distanzen von z.B. Offshore Windparks zu Verbrauchszentren, handelt es sich bei modernen Stromsystemen nach [Becker \(2020\)](#) um Wechselstromanwendungen. Dies liegt historisch darin begründet, dass Wechselstrom via Transformatoren deutlich verlustärmer zwischen verschiedenen Spannungsebenen transformierbar war. Moderne Leistungselektronik ermöglicht jedoch mittlerweile auch Gleichstrom für besonders verlustarmen Langstreckentransport in sogenannten High Voltage Direct Current (HVDC) Systemen zu transformieren und einzusetzen.

Die Transformierung der Spannung erfolgt dabei in Umspannwerken, welche als eigene Netzebenen (2, 4 und 6) klassifiziert Knotenpunkte zwischen den Leitungen darstellen. Becker unterteilt Leitungen dabei in über Masten geführte Freileitungen und Untergrundleitungen, welche im Boden vergraben sind. Nieder- und je nach Netzgebiet auch Mittelspannungsleitungen sind in Deutschland meist als Erdkabel ausgeführt, während der überwiegende Anteil der Hoch- und Höchstspannungsleitungen als Freileitungen gebaut werden. Letztere sind durch einfacheres Design, bessere Wartbarkeit und leichtere Inspektionsverfahren deutlich günstiger zu einzusetzen.

Freileitungen sind auch vor dem Hintergrund der Möglichkeit von Sichtinspektionen die für diese Arbeit relevante Art von Stromleitungen. Neben den eigentlichen Leiterkabeln selbst, sind ebenfalls die sie tragenden Freileitungsmasten inklusive deren Aufhängungen und Isolatoren (siehe Abbildung 3.3) von Relevanz für eine luftgestützte Sichtinspektion.

Der Umfang an Leitungskilometern im Deutschen Stromnetz beträgt laut [Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz \(2022\)](#) 37.000 km im Höchstspannungsübertragungsnetz und 97.000 km im Hochspannungsverteilstromnetz. Diese Netzebenen sind somit der relevante zu betrachtende Markt für luftgestützte Freileitungsinspektionen. Zusätzliche 520.000 km in der Mittelspannung und 1.190.000 km in der Niederspannung sind dagegen nur zu geringen Teilen als Freileitung ausgeführt.

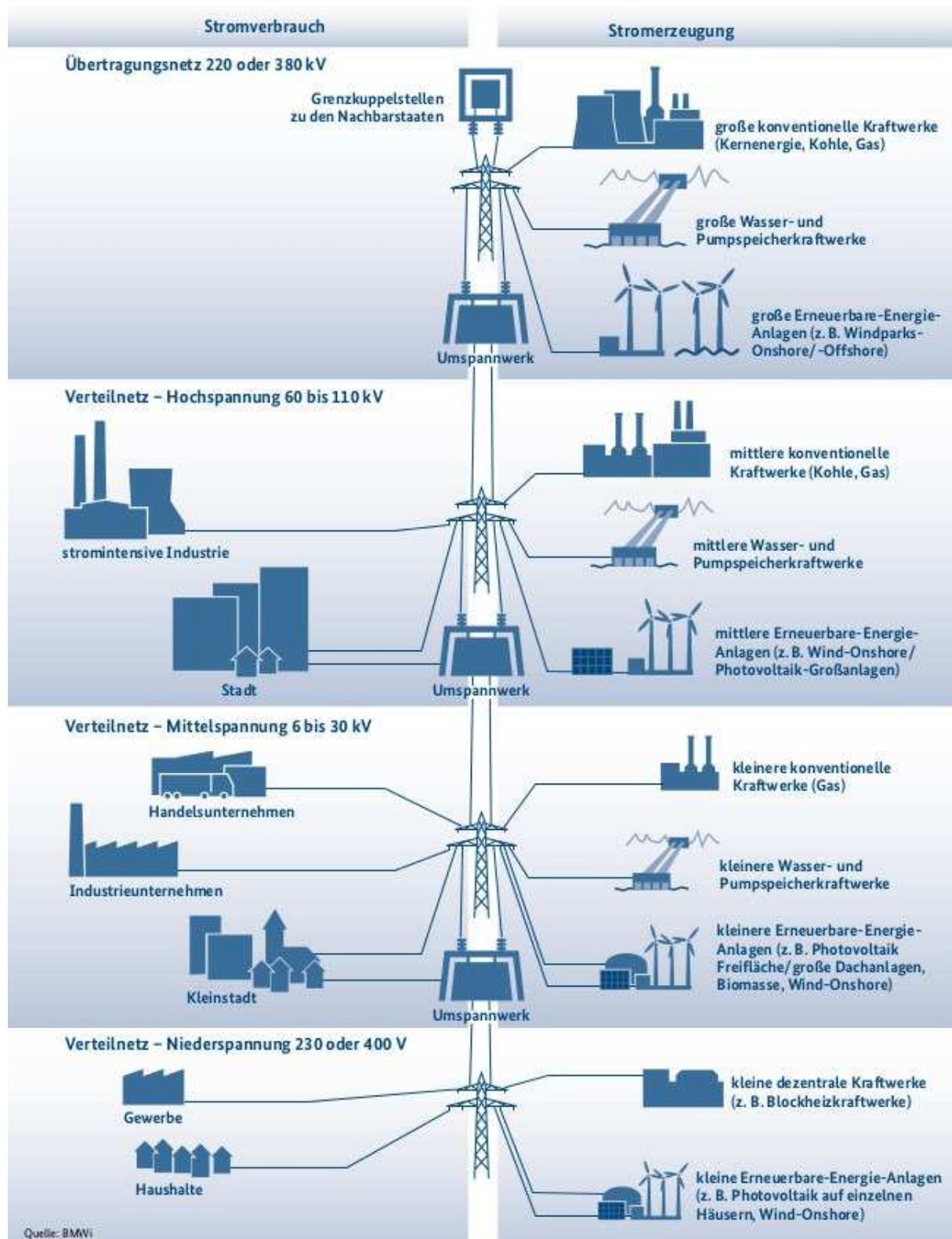
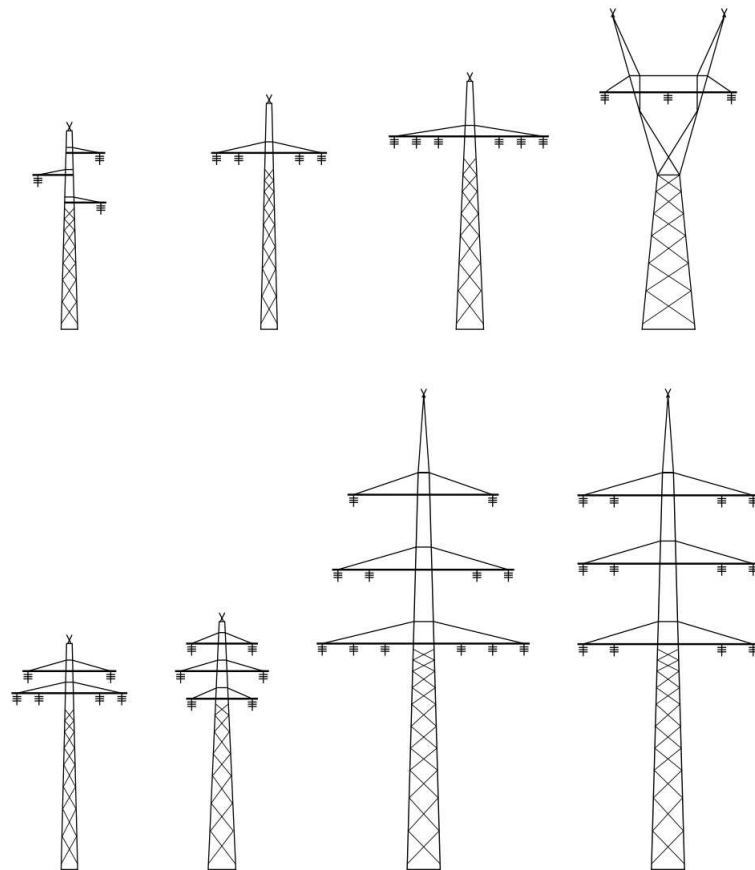


ABB. 3.2: Netzebenen des deutschen Stromsystems (*Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022*)

ABB. 3.3: Arten. von Freileitungsmasten ([Becker, 2020](#), S. 1197)

3.1.2 Inspektionsanforderungen und Anwendbarkeit von UAVs und Satelliten

Zum sicheren Betrieb von Freileitungen sind regelmäßige Inspektionsvorgänge notwendig. [Nguyen et al. \(2018\)](#) bieten in *Automatic Autonomous Vision-based Power Line Inspection: A Review of Current Status and the Potential Role of Deep Learning* einen exzellenten Überblick zu den Anforderungen und Möglichkeiten luft- und satellitengestützter Fernerkundungsmethoden im Kontext von Stromnetzen. Beispielsweise können die Positionen oder etwaige Deformationen von Pylonen, Leiterseile und elektrische Komponenten mit optischen Luftbildern, vom Boden aus aufgenommenen optischen Bildern, jeweils mit Unterstützung von LIDAR Sensordaten ermittelt werden. Weiterhin sind Thermalbilder gut geeignet, um defekte Komponenten zu identifizieren, welche zu erhöhten Verlustleistungen und dadurch lokaler Erwärmung führen. UV-Bilder wiederum können Aufschluss über die Abschirmung starker elektrischer Felder geben und ebenfalls auf Defekte hinweisen.

Einer der vordringlichsten Bereiche ist hierbei das Vegetationsmanagement oder

auch ökologisches Schneisenmanagement genannt. *Ferguson Nick (VP Infrastructure - LiveEO) (2021)* unterscheidet hierbei in die beiden Teilbereiche von Einwuchsvegetation und Windbruchvegetation: Bei ersterem Typ wächst Flora nach und nach von unten in den Leitungsbereich hinein bis schließlich die zur Isolation der Hochspannung notwendigen Mindestabstände unterschritten werden und die Möglichkeit eines Lichtbogenüberschlages besteht.

Mit Einführung von Inspektionspflichten unter Einsatz von bodengestützten LIDAR Sensoren konnte diese Art von Schäden deutlich reduziert werden, wie Daten des Beratungsunternehmens CN Utility Consulting in einer Ausarbeitung von *Miller (2020)* in Abbildung 3.4 zeigen. Während die vorhandenen Daten auf die USA fokussieren, erscheint eine Übertragbarkeit auf Europa grundsätzlich angeraten.

Windbruchschäden durch seitständige Bäume jedoch stellen ein nach wie vor persistentes Problem dar (Abbildung 3.5), da diese durch Bodenlidarsysteme nicht zuverlässig in ihrer Höhe erfasst werden können. Eine geometrische hinreichende Vermessung muss zwangsläufig aus der Luft erfolgen, weshalb gegenüber konventionellen bemannten Luftbildbefliegungen Drohnenbefliegungen eine attraktive Option darstellen, um die potentiellen Fallradien der Bäume zu erfassen. *Ferguson Nick (VP Infrastructure - LiveEO) (2021)* weist darüber hinaus auf die Vorteile einer Ergänzung durch satellitengestützte Infrarotdaten zur Ermittlung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) als Maß für die Baumgesundheit hin. Dies kann es je nach Gesetzeslage erleichtern, eine präventive Fällung gefährlicher Bäume vorzunehmen, welche außerhalb des Wegrechtes der Netzbetreibers liegen. Moderne SAR Satelliten in Kombination mit NDVI und optischen Daten erweisen sich als grundsätzlich durchaus geeignet, um den Inspektionsanforderungen des Vegetationsmanagement gerecht zu werden, sofern ausreichende Sicherheitsabstände und entsprechende Toleranzwerte zu vertretbarer Vegetation eingehalten werden.

Nguyen et al. (2018) führen als weiteren, exklusiv Drohnen vorbehaltenen Inspektionsvorgang das Erkennen von Eisbildung auf den Leitungskabeln auf. In klimatisch kalten Ländern, wie Norwegen, kann dies bei zu großer Eislast auf den Leitungskabeln zu einem Abreißen der Leitungen¹, Aufhängungen oder Bruch der Maßten führen. Eine Erkennung durch Satelliten ist hierbei auf Grund zu geringer Auflösung zur Erkennung des Kabelquerschnittes von nur wenigen Zentimetern ausgeschlossen.

Neben derartigen Umgebungseinflüssen nennt *Nguyen et al. (2018)* die eigentliche Zustandsbewertung der elektrischen und statischen Anlagen als von besonderem Interesse für luftgestützte UAV-Inspektionen. Während für eine hinreichende Bildqualität die Cruise geschwindigkeit nicht beliebig hoch sein dürfe, versprechen

¹Im Jahr 2005 verursachten Eislasten das Umknicken diverser Strommasten im Münsterland, was zu großflächigen Stromausfällen führte.

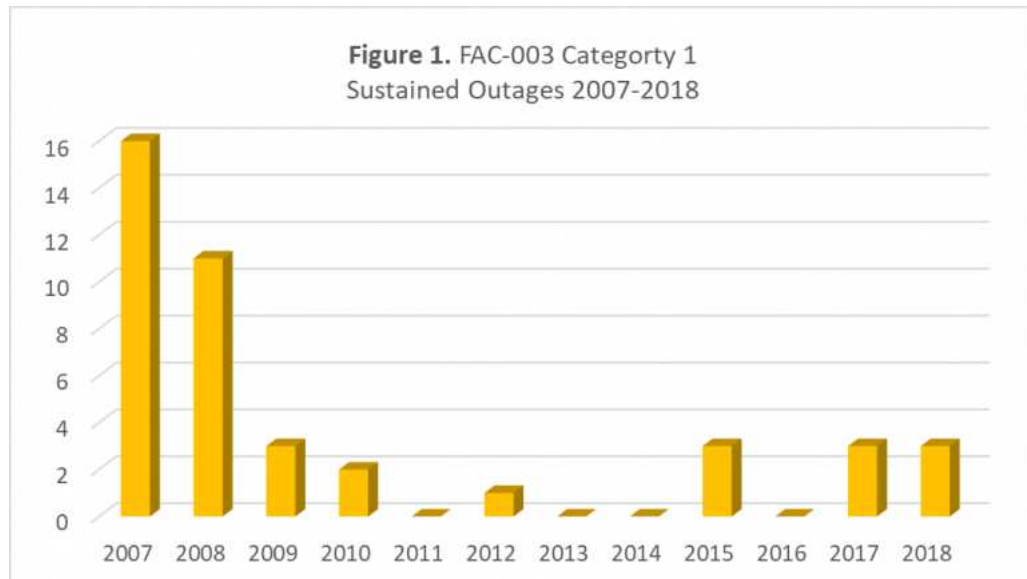


ABB. 3.4: Anhaltende Stromausfälle verursacht durch einwachsende Vegetation - USA (*Miller, 2020*)

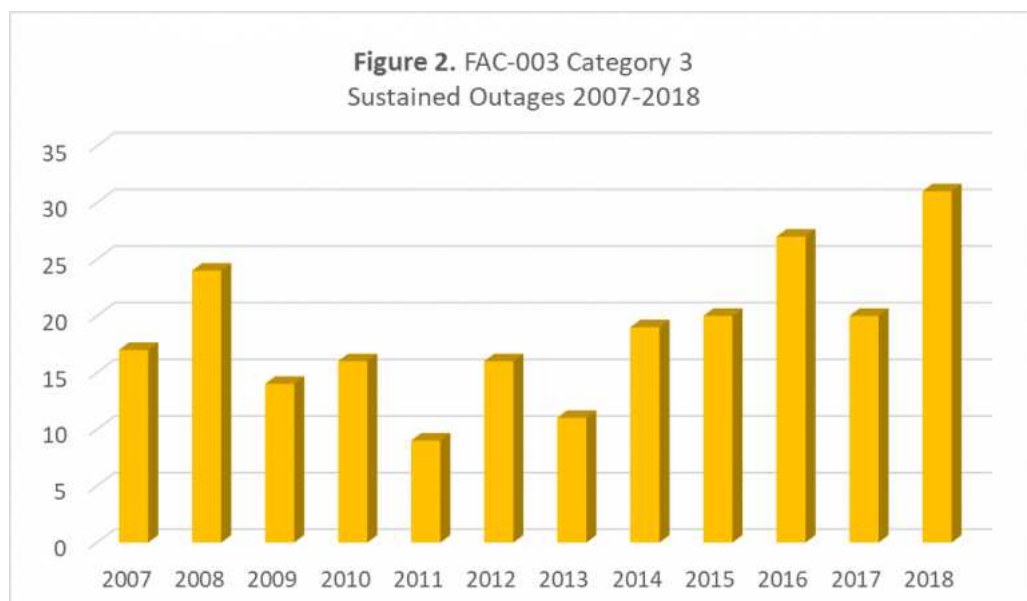


ABB. 3.5: Anhaltende Stromausfälle verursacht durch umfallende Bäume von außerhalb des Wegerechtes der Netzbetreiber - USA (*Miller, 2020*)

UAVs dennoch eine ausreichende gute Datenqualität, welche helikopter- oder bodengestützten Sichtprüfungen überlegen sein können. Gleichwohl bestünden in der Präzisionsnavigation in unmittelbarer Nähe zu Stromleitungen noch zu lösende technische Herausforderungen, welche jedoch flugphysikalisch lösbar erscheinen, wie bereits frühe Arbeiten von beispielsweise *Adabo u a. (2013)* zeigen. (*Schultze, 2020, S.713*) schlägt als optimale Flugtrajektorie analog zu Helikopterbefliegungen einen seitlichen Abstand von 20 m bis 40 m in einem vertikalen Winkel von 45° vor.

Im optischen Bereich demonstrieren *Nguyen et al. (2018)* die Detektierbarkeit diverser Schäden wie Korrosion, gebrochene oder fehlende Komponenten, defekte Isolatoren oder Schäden durch Tiere oder andere Störgegenstände. Darüber hinaus werden zur Erkennung von elektrischen Defekten Kameras im Infrarot- ("Thermographie") oder Ultraviolettbereich vorgeschlagen, was *Schultze (2020)* bestätigt. So verursachen Bruchstellen oder korrodierte Leitungen erhöhten elektrischen Widerstand, welcher über die dadurch resultierende Hitzeentwicklung erfasst werden kann (Abbildung 3.6). Ungewollte elektrische Entladungen in einem stark isolierenden Medium wie beispielsweise Luft führen zur Emission relativ hochenergetischer Photonen im UV-Bereich, welche wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, erfasst werden können. Dies kann zur Reduktion unnötiger Übertragungsverluste sowie Funkstörungen genutzt werden, wie *Borneburg (2004)* ausführt.



ABB. 3.6: Standbild einer Thermalkamera von einem technischen Leitungsdefekt, welcher zu einer Hitzequelle führt (*Schultze, 2020, S.716*)

Darüber hinaus schlägt *Schultze (2020)* eine LIDAR Vermessung der Strommasten zur Erkennung etwaiger Bodenverschiebungen oder Verbiegungen vor. Zusätzlich



ABB. 3.7: Koronaentladung am Koronaring einer 500-kV-Freileitung (*Cor, 2013*)

kann über die Position der Leitungskabel die Kabelspannung ermittelt werden sowie die Hindernisfreigrenzen zu benachbarten Gebäuden oder Vegetation überprüft werden.



ABB. 3.8: LIDAR Vermessung der Mastgeometrie sowie der angrenzenden Stromleitungen (*Schultze, 2020, S.717*)

3.2 Gaspipelines

3.2.1 Infrastrukturtopologie

Erdgas ist ein bedeutender Energieträger in vielen Ländern und hat innerhalb der letzten 40 Jahre sowohl in Deutschland wie auch global in seiner Verwendung stark zugenommen, wie Abbildungen 3.9 und 3.10 zeigen. So stieg der jährliche deutsche Gasverbrauch von ca. 600 TWh im Jahr 1980 auf über 900 TWh im Jahr 2021. Global fällt der Anstieg in diesem Zeitraum von 14.000 TWh auf über 40.000 TWh noch deutlicher aus.

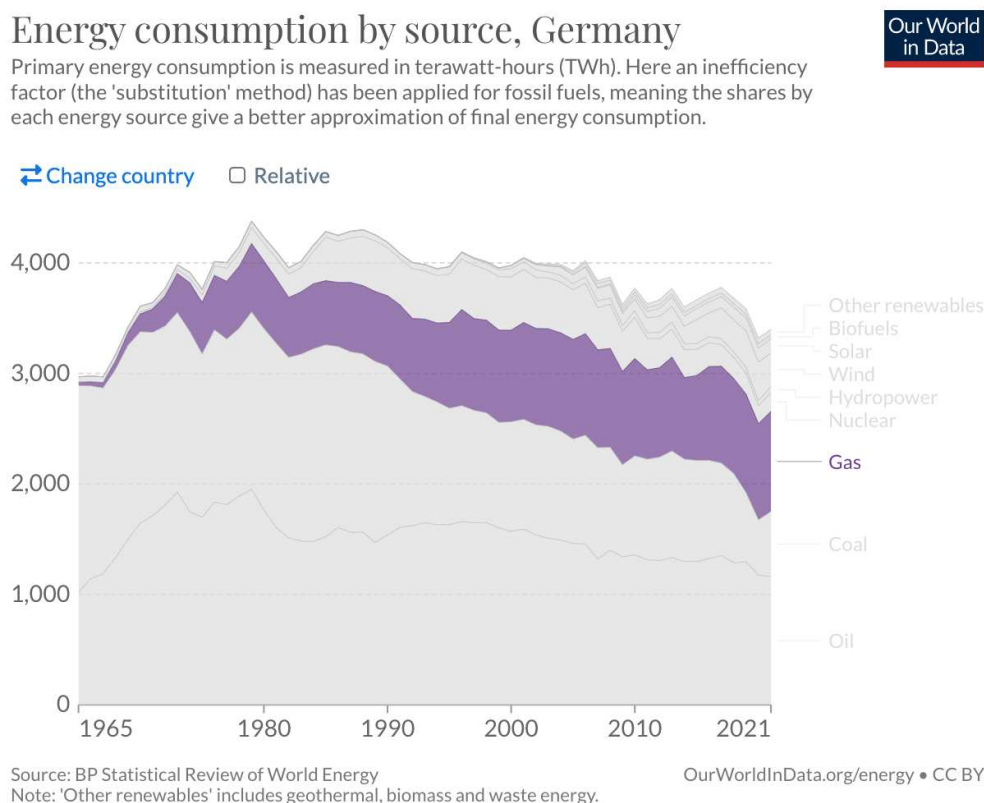


ABB. 3.9: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland (*Our World in Data, 2022a*)

Zwar gehen Studien zum transformierten erneuerbaren Energiesystem wie z.B. vom Thinktank *Agora Energiewende* (2021) auch langfristig vom Einsatz von Energiegasen, vorwiegend in Form von Wasserstoff, aus, doch wird die Menge und die Dezentralität des Einsatzes bei vielen Kleinverbrauchern deutlich zurückgehen.² Dies hat Auswirkungen auf die für Transport und Distribution benötigte Infrastruktur, weswegen Energiesystemexpertinnen wie *Kemfert et al.* (2022) von einem

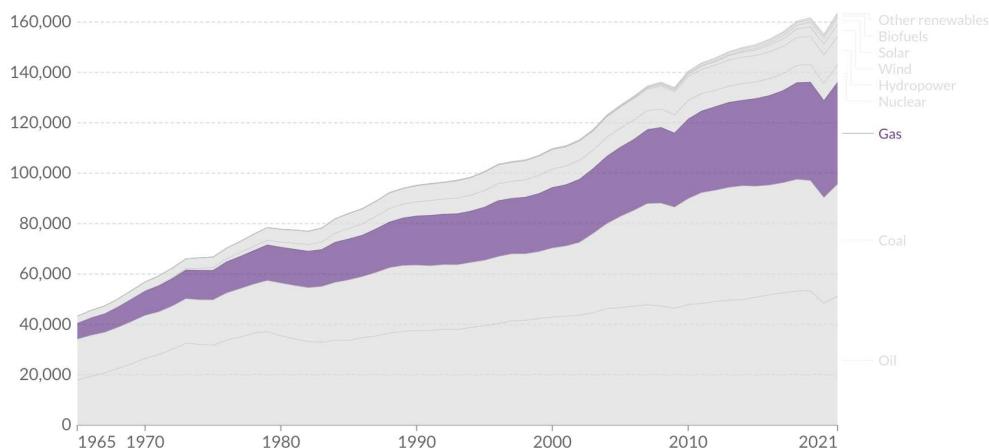
²Die zunehmende installierte Nominalleistung an Gaskraftwerken, wird auf Grund abnehmender Volllaststunden dennoch nicht zu einem zwischenzeitlichen Ansteigen des Gasbedarfes führen.

Energy consumption by source, World

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.



Change country Relative



Source: BP Statistical Review of World Energy
Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

ABB. 3.10: Globaler Primärenergieverbrauch nach Energieträgern (*Our World in Data*, 2022b)

weiteren Ausbau der Erdgasinfrastruktur abraten. Nichtsdestotrotz würde die bestehende Infrastruktur³ für weitere ein bis zwei Jahrzehnte genutzt werden und dann auf einen geringeren Umfang zurückgefahren werden können.

Der Transport dieses Energieträgers erfolgt auf Grund seines gasförmigen Zustandes überwiegend leitungsgebunden und nur im internationalen Handel teilweise in kryogen-verflüssigter Form als LNG (*Riemer*, 2011). Insbesondere der Transport und Verteilung innerhalb kontinental geprägter Topographien stützt sich fast ausschließlich auf Pipelinenetze als dominierende Infrastruktur. Die Länge des deutschen Pipelinenetzes erstreckt sich dabei laut *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* (2022) auf insgesamt 511.000 km, wovon allerdings ähnlich wie beim Stromnetz der größte Teil auf urbane Verteilnetze entfällt: So entfallen laut *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.* (2019) 33% der Netzlänge auf Niederdruck- (bis 100 mbar), 42% auf Mitteldruck- (bis 1 bar) und nur 25% auf Hochdruckleitungen (bis 200 bar). Für luftgestützte Inspektionen sind vor allen Dingen Hochdruckleitungen des Gasfernleitungsnetzes (Abbildung 3.11) von Relevanz, das diese nicht von Gebäuden oder Straßeninfrastruktur überbaut sind, wie es häufig in urbanen Umfeldern der Fall ist.

Hinsichtlich des internationalen Gasfernleitungsbestandes führen *Rodríguez-Gómez et al.* (2015) aus, dass die Datenlage nicht immer ideal ist, da manche Länder keine Daten zu Leitungslängen veröffentlichen oder wichtige Gastransitländern

³ergänzt um Liquefied Natural Gas (LNG) Terminals zur kurzfristigen Kompensation des durch Russland verhängten Erdgasembargos

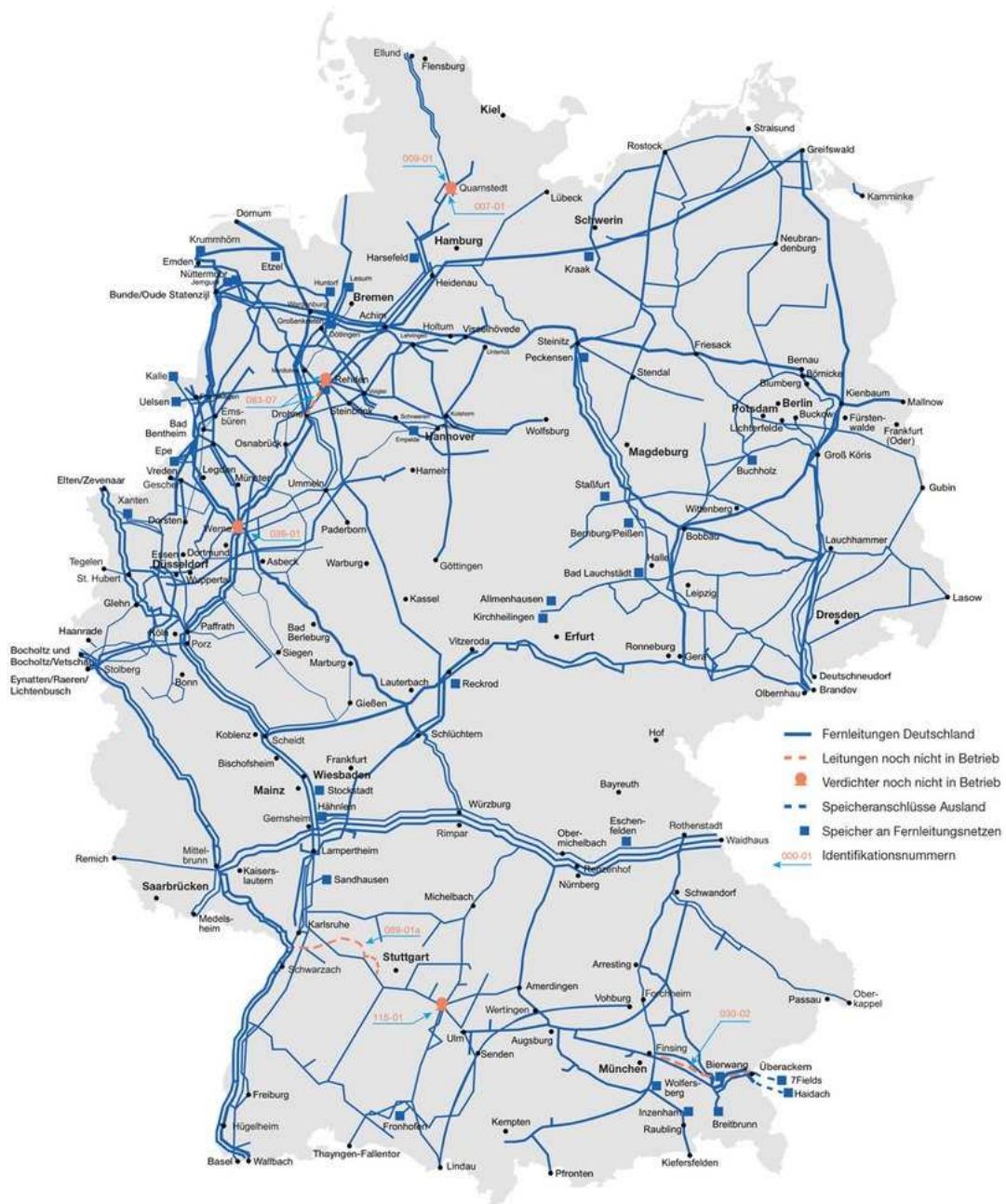


ABB. 3.11: Das deutsche Gasfernleitungsnetz (*Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2022*)



ABB. 3.12: Verdichterstation der North Stream Pipelines in Lubmin (*Joachim Schmidt, 2022*)

wie Russland und die Türkei auf zwei Kontinenten liegen, was in manchen Statistiken zu Doppelzählungen führt. Die Unternehmensberatung *GlobalData* (2022) nennt als Länge der globalen Erdgasfernleitungen ca. 1,4 Mio. km., welche sich zu 37% auf die USA, 14% auf Russland, gefolgt von Kanada, China und Indien mit um die 5% Anteil verteilen. Die europäische Union kommt in Summe auf etwa 11% des Leitungsnetzes, wovon wiederum etwa 3% auf Deutschland entfallen.

Woldeyohannes und Majid (2011) führen aus, dass Pipelinesysteme im Kern aus den Hauptkomponenten der eigentlichen Rohrleitungen (Abbildung 3.13) sowie den Kompressorstationen (Abbildung 3.12) bestehen, welche über Druckaufbau die Betriebsenergie zum Transport des Gases zuführen. So müssen in der Regel alle 100 km bis 150 km Leitungsdruckverluste ausgeglichen werden, wodurch der Betriebsdruck wieder auf 100 bar angehoben wird. Rohrleitungen und Kompressorstationen werden in den meisten Pipelinesystemen durch mehr oder weniger große Druckspeicher ergänzt, die meist als Untergrundkavernen ausgeführt sind. Wegen der hohen Systemkomplexität und dadurch oftmals verdeckten Blickwinkeln von Verdichterstationen sind für die Fernerkundung durch Langstreckendrohnen vor allem Rohrleitungen geeignet.

3.2.2 Inspektionsanforderungen und Anwendbarkeit von UAVs und Satelliten

Hinsichtlich der Inspektionsanforderungen sei exemplarisch fortan ein Fokus auf Deutschland als lokalen Heimatmarkt sowie die USA als internationalen Leitmarkt hinsichtlich Leitungslänge gelegt. Für Deutschland werden die Richtlinien zur Inspektion von Gasleitungen vom *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.* (2018) erstellt und veröffentlicht. Für Hochdruckfernleitungen über 16 bar Betriebsdruck ist die Technische Regel DVGW G 466-1 (A) entscheidend. Sie führt



ABB. 3.13: Errichtung einer Erdgaspipeline (*National Parks Conservation Association, 2007*)

aus, dass durch regelmäßige Inspektionen folgende Gefahrenursachen vermieden werden sollen:

- Bautätigkeiten
- Ramm- und Sprengarbeiten
- Bodenbewegungen
- Korrosion
- Herstellungsfehler
- Undichtigkeiten
- Verfärbungen der Vegetation
- Windbruch

Hierbei schreiben weder die deutschen Normen noch die der *American Society of Mechanical Engineers (2004)* explizit eine Befliegung aus der Luft zum Zwecke des “periodic pipeline control programs” vor, doch sind helikoptergestützte oder drohnengestützte Inspektionsflüge für Überlandleitungen meist die praktikabelste Methode die großen Distanzen zu überbrücken (*Rathlev et al., 2012; Thyssengas, 2020; Cerezo, 2020*). Laut *Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2016)* können allerdings nur manche der Inspektionsziele per Fernerkundung aus der Luft erfüllt werden. So werden beispielsweise für Prüfungen auf Korrosion und Herstellungsfehler vom Boden aus vorgenommen und teilweise Kontaktmessinstrumente verwendet. Dies betrifft insbesondere die technisch komplexeren Teilsysteme eines Pipelinesystems wie Verdichterstationen und Speicher, weshalb diesen

im Rahmen dieser Arbeit keine vertieftere Rolle bei luftgestützten Inspektionen zugeordnet werden.

Geeignet für die luftgestützte Inspektion sind insbesondere das Erkennen von Bautätigkeiten, Ramm- und Sprengarbeiten und Bodenbewegungen. Für das Vegetationsmanagement ist eine Luftbefliegung ebenfalls gut geeignet. Hierbei wird ein Streifen entlang der Pipeline von Büschen und Bäumen freigehalten, um Schäden durch Wurzelung und Windbruch zu vermeiden, sowie ober- wie auch unterirdische Leitungen frei zugänglich für eilige Reparaturarbeiten zu halten. Diese Inspektionsarbeiten können mit (stereo-)optischen Kameras ggf. in Kombination mit LIDAR oder RADAR zur genaueren Erfassung der Oberflächengeometrie erfüllt werden. Satellitengestützte Sensoren mit einer optischen GSD Auflösung von 30 cm und einer noch darunter liegenden RADAR-Auflösung werden hierfür als absolut ausreichend eingestuft. Darüber hinaus können Undichtigkeiten (Methanleckagen) aus der Luft detektiert werden. Hierfür werden bislang relativ schwere DIAL Sensoren in einem Helikopter mitgeführt ([Mahnke, 2019](#)), welche durch Messung des Absorptionsspektrums der Luft auch geringe Konzentrationen an Methangas nachweisen können. Neuere miniaturisierte DIAL Systeme sind deutlich kleiner und leichter und können nunmehr auch von Drohnen getragen werden, wie [Baker Hughes \(2019\)](#) zeigt.

Die vorgeschriebenen Inspektionsintervalle für diese Überprüfungen unterscheiden sich nach [United Nations Economic Commission for Europe \(2020\)](#) international erheblich und werden laut Branchenaussagen teilweise sogar auf freiwilliger Basis unterschritten, um die Wahrscheinlichkeit für teure Systemausfälle zu reduzieren. In Deutschland hängt die Mindesthäufigkeit der Inspektion laut [Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. \(2018\)](#) von der Umgebung ab: So sind kürzere Abstände vorgeschrieben, wenn es sich um bebauten Gebiet oder eine Bergbauregion handelt, in welcher für Pipelines gefährliche Bodenabsenkungen vorkommen können. Während grundsätzlich eine örtliche Begehung im Abstand von vier Monaten vorgesehen ist, kann dieses Intervall auf sechs Monate verlängert werden, wenn alle vier Wochen eine Befliegung stattfindet. Darüber hinaus kann der Befliegungsabstand sogar auf zwei Monate ausgedehnt werden, wenn die lokalen Verhältnisse und betriebliche Erfahrung dies zulassen. Dies ist allerdings nur für Gebiete ohne Bebauung und Bergbau möglich. Tabelle 3.1 stellt dies als Übersicht dar.

In den USA richten sich die Befliegungsintervalle laut [American Society of Mechanical Engineers \(2004\)](#) nach Standortklassen, welche sich durch die Dichte der Bebauung im Umfeld von 200 m einer Pipeline charakterisieren. Eine Übersicht über die Standortklassen liefert Tabelle 3.2.

Über die normativen oder gesetzlichen Vorgaben hinausgehende kürzere Befliegungsintervalle sind laut [Hesselbarth et al. \(2001\)](#) international jedoch der Standard, um Schäden im Pipelinebetrieb zu minimieren. So wären in Europa und den

TAB. 3.1: Befliegungsintervalle für Erdgasfernleitungen in Deutschland (*Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.*, 2018)

Örtliche Gegebenheiten	Intervall	Umfang
ohne Bebauung und ohne Bergbau	alle 4 Wochen alle 6 Monate	Befliegen Örtliche Kontrolle der wichtigen Betriebspunkte
ohne Bebauung, mit Bergbau	alle 4 Wochen einmal monatlich	Befliegen Begehen oder Befahren inkl. Prüfen auf Dichtheit von Rohrleitungsteilen oder bei vorhandenen Straßenkapfen über den Rohrleitungsteilen mit einem Gaskonzentrationsmessgerät
mit Bebauung, ohne Bergbau	alle 4 Wochen einmal jährlich	Befliegen oberirdische Prüfung
mit Bebauung, mit Bergbau	alle 4 Wochen alle 2 Wochen	Befliegen Begehen oder Befahren inkl. Prüfen auf Dichtheit von Rohrleitungsteilen oder bei vorhandenen Straßenkapfen über den Rohrleitungsteilen mit einem Gaskonzentrationsmessgerät

TAB. 3.2: Befliegungsintervalle für Erdgasfernleitungen in den USA (*Cornell Law School*, 2022)

Standortklasse	Definition	Inspektionsintervall
1	offshore oder kleiner gleich 10 Gebäude	jährlich
2	mehr als 10, weniger als 46 Gebäude	jährlich
3	Mehr als 46 Gebäude oder die Leitung liegt innerhalb von 91 Metern an einem Gebäude oder einem Außenbereich, der von mehr als 20 Personen mindestens 5 Tage die Woche für insgesamt 10 Wochen in einem Jahr benutzt wird	alle 6 Monate
4	Gebäude mit mindestens 4 Stockwerken	alle 3 Monate

USA Befliegungsintervalle von 14 Tagen üblich, wengleich jeder Betreiber diese Abwägung selbst trifft.

3.3 Bahnstrecken und Oberleitungen

3.3.1 Infrastrukturtopologie

Die dritte Infrastrukturklasse, welche im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch betrachtet wird, sind Schienennetze. Hierbei relevant sind einerseits die Schienen selbst wie auch deren Signalkabelwege sowie elektrische Energieversorgung, wo Oberleitungen vorhanden sind. Für das deutsche Bahnnetz, welches in Kapitel 5.1 als Fallbeispiel verwendet wird, beträgt die Länge des Regional- und Fernschienennetzes betrieben durch die *DB Netz AG* (2019) ca. 34.000 km. Hiervon ausgenommen sind städtische S Bahnen zu intra-urbanem Transport. Abbildung 3.14 zeigt hierbei die Streckenverläufe und stellt die elektrifizierten Streckenabschnitte in blau dar.

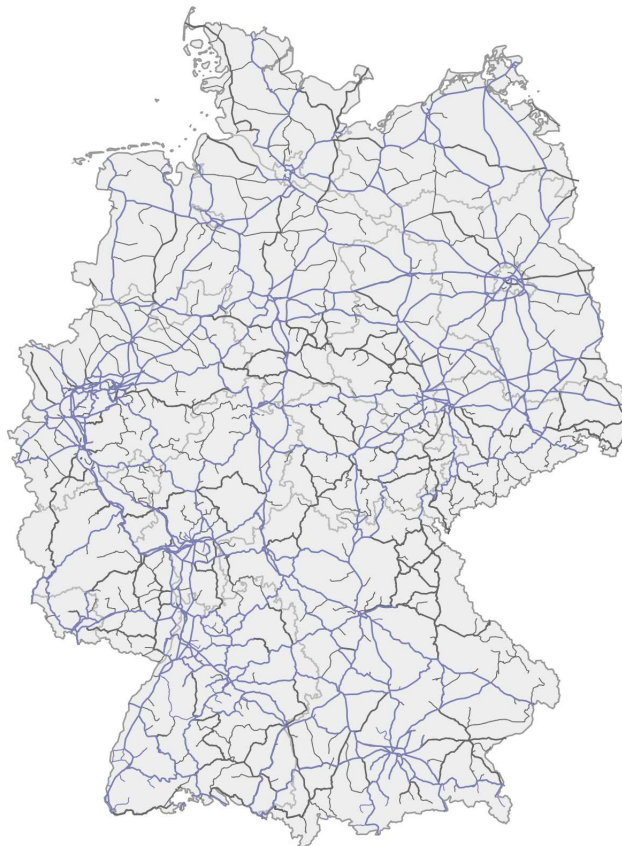


ABB. 3.14: Das deutsche Schienennetz (dick = Hauptstrecke, dünn = Nebenstrecke, blau = elektrifiziert, grau = nicht elektrifiziert) (*DB Netz AG*, 2019)

Im internationalen Kontext verteilen sich die meisten Streckenkilometer jedoch auf Asien sowie den amerikanischen Kontinent (vgl. Abbildung 3.15) gefolgt von Europa. Deutlicher wird der Abstand zwischen den Kontinenten, betrachtet man die mit dem vorhandenen Streckennetz zurückgelegten Personenkilometer. Hier

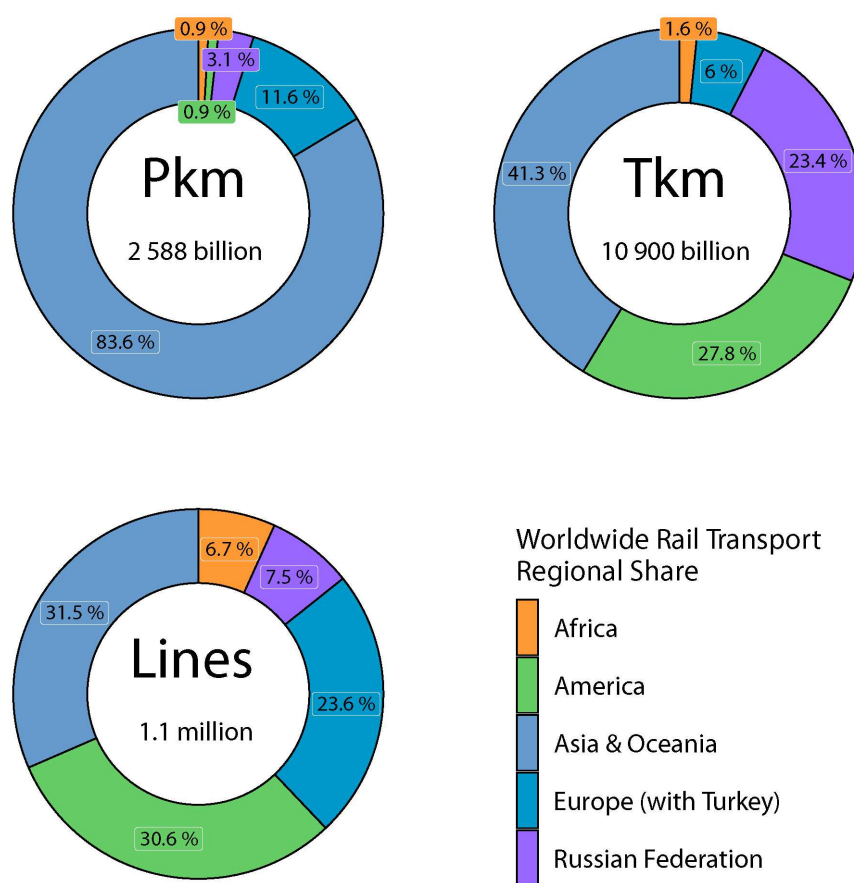


ABB. 3.15: Regionale Verteilung des Eisenbahntransportes nach Personenkilometern (Pkm), Tonnenkilometern (Tkm) und Streckenlänge (lines) (*International Union of Railways, 2020*)

dominiert Asien aufgrund des in China äußerst bedeutsamen Hochgeschwindigkeitsfernverkehrsnetzes mit 83% Marktanteil an den global zurückgelegten Personenkilometern deutlich, während dieser Sektor in Amerika fast keine Rolle spielt. Im Bereich des Frachtverkehrs ist ebenfalls Asien mit 41% die bedeutendste Weltregion. Während Amerika mit 27% hier einen erheblichen Anteil aufweist, fällt vor allem Russland auf, welche auf nur 7,5% des globalen Streckennetzes 23,4% des globalen Schienengüterverkehrs abwickelt.

Neben der absoluten Anzahl an Streckenkilometern ist im Kontext dieser Arbeit vor allem auch deren geographische Verteilung relevant, da dies erheblichen Einfluss auf die Effizienz und Kapitalintensität haben kann, mit der ein bestimmtes Streckennetz beflogen werden kann. Je dichter mehrere Eisenbahnstrecken beisammenliegen, desto mehr Streckenkilometer befinden sich im Einzugsgebiet einer Betriebsbasis und desto effizienter können Routenführungen geplant werden, welche sowohl Hin- wie auch Rückwege produktiv nutzen. Die Karte der *International Union of Railways* (2020) zeigt, dass die dichtesten Eisenbahnnetze der Welt in

TAB. 3.3: Staaten mit den größten Schienennetzwerken sowie deren geographischen Dichte (*Central Intelligence Agency, 2022*)

Staat	Eisenbahnnetz (in km)	Netzdichte (in km/km ²)
USA	293.564	29,9
China	150.000	12,9
Russland	85.513	5,0
Indien	65.554	20,5
Kanada	49.442	7,8
Deutschland	39.379	93,4
Argentinien	36.917	13,3
Australien	33.011	4,3
Brasilien	29.849	3,5
Frankreich	27.860	46,0

Europa existieren und sonst lediglich Japan in die Nähe dieser Werte kommt. Insbesondere Deutschland mit seinen Nachbarländern Tschechien, Schweiz und Belgien sticht hierbei hervor und weist besonders vorteilhafte Bedingungen auf.

Tabelle 3.3 auf Basis von Daten des *World Fact Book* der *Central Intelligence Agency* (2022) zeigt die zehn größten Schienensysteme für einzelne Staaten weltweit und stellt diese der Netzdichte gegenüber. Hierbei werden klar die USA gefolgt von China als die größten Märkte für Eisenbahninfrastrukturinspektionen identifiziert, welche allerdings nur mittlere Netzdichten von 29,9 bzw. 12,9 km/km² aufweisen. Unter den zehn größten Systemen weisen Deutschland (Platz 6) und Frankreich (Platz 10) die mit Abstand höchsten Netzdichten und damit eine hohe Attraktivität für eine effiziente Befliegung auf.

3.3.2 Inspektionsanforderungen und Anwendbarkeit von UAVs und Satelliten

Jenseits der geographischen Charakterisierung der größten Märkte für Eisenbahninfrastrukturinspektionen ist eine Analyse der technischen Eignung einzelner Teilbereiche für die luftgestützte Inspektion erforderlich, um die grundsätzliche Eignung drohnen- oder satellitengestützter Methoden beurteilen zu können.

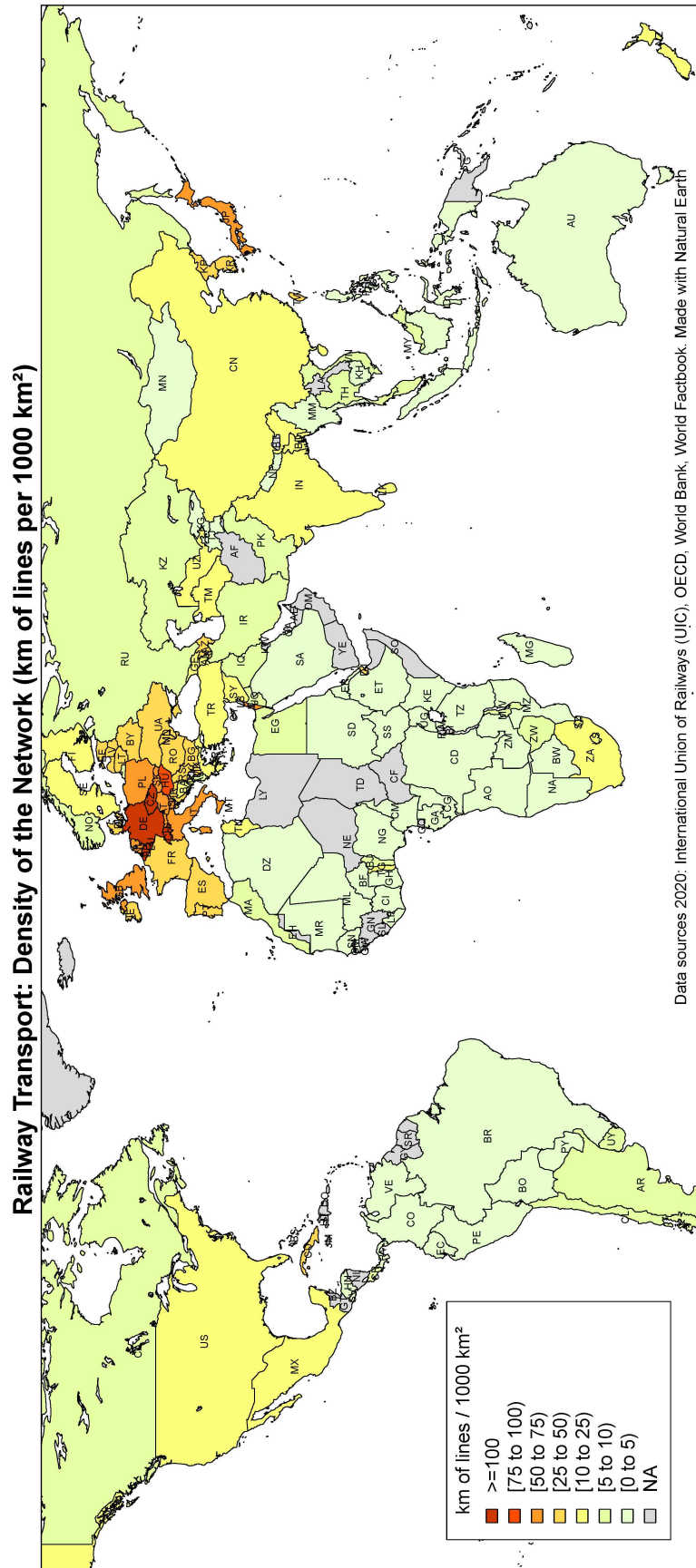


ABB. 3.16: Dichte der Schienennetze nach Staat (*International Union of Railways, 2020*)

Tzanakakis (2021) unterteilt das Eisenbahnsystem in seine Teilsysteme entlang deren diese Bewertung vorgenommen werden kann:

- Gleiskörper
 - einzelne Schienen
 - Bahnschwellen
 - Schienenbefestigungsmittel
 - Gleisbett
 - Weichen
 - Speziialschientypen in Depotbereichen
- Ingenieurbauwerke
 - Böschungen
 - Einschnitte
 - Brücken
 - Tunnel
 - Bahnhofsgebäude
 - andere Ingenieursbauwerke
- Energieversorgung
 - Oberleitungen
 - Oberleitungsmasten
 - Spanngewichte
- Signal- und Kommunikationssysteme
- Safety und Security Systeme
- Hilfssysteme

Marx et al. (2003) geben für diese Subsysteme in seinem Standardwerk “Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus” eine Übersicht der durchzuführenden Inspektionsmaßnahmen. Ist wird dabei recht schnell ersichtlich, dass luft- und satellitengestützte Methoden in den Bereichen der Signal- und Kommunikationssysteme, der Safety und Security Systeme sowie der Hilfssysteme kaum sinnvoll einsetzbar sind, da es sich hier überwiegend um elektronische Komponenten mit nicht von außen überprüfbarer Funktionalität handelt.

Für die luftgestützte Ferninspektion von Relevanz sind daher vor allen Dingen die Subsystemklassen des Gleiskörpers, der den Gleiskörper umgebenden Ingenieurbauwerke sowie, wo vorhanden der Oberleitungsenergieversorgung von Relevanz.

Während die Gleiskörper nach *Marx et al. (2003)* traditionellerweise durch Begehungen inspiziert werden, verwenden neuere Verfahren digitalisierte kamera- und radargestützte Methoden etwa von Inspektionsschienenfahrzeugen aus (*Wolf et al., 2018*) oder aus der Luft per Drohne (*Ivashov et al., 2019*). Satelliten sind für die Zustandserkennung des Gleiskörpers selbst jedoch kaum geeignet, da die kommerziell verfügbare Auflösung von 30 cm nicht ausreicht, um übliche Schäden zuverlässig zu erkennen. Eine Datenerfassung aus der Luft erweist sich hierbei jedoch als durchaus geeignet, um mit bis zu 1 cm Auflösung z.B. Bruchstellen in Bahnschwellen, Schienen oder Halterungsklammern zu erkennen. Geometrische Eigenschaften des Schienenverlaufes können mit Hilfe gerichteter LIDAR Sensoren mitunter noch genauer als mit 1 cm Abweichung erfasst werden.

Bei Ingenieurbauwerken und Tiefbauten sind die geeigneten Methoden durchaus heterogener. So kann der Verlauf der Trassierung inklusive etwaiger Bodenabsenkungen, Verschiebungen des Gleisbettes (Schotter oder Beton) sowie von Böschungen und Einschnitten mit hinreichender Genauigkeit per Satellit aus dem All erfasst werden, indem ein Topologiemodell mit bis zu 20 cm Genauigkeit erstellt wird. Selbst Unterspülungen des Schotterbettes können aus der Luft oder dem All erkannt werden, indem die farblichen Veränderungen durch das durch Reibung entstehende Steinmehl mit Hilfe visueller Bilder detektiert werden. Eine weitere Inspektionsanwendungsfall ist der Bereich des Vegetationsmanagements: Hier ist es ebenso wie bei Pipelines und Stromleitungen erforderlich einen gewissen Mindestabstand zwischen Infrastruktur und umliegenden Bäumen und Gebüsch einzuhalten, um Störeinflüsse etwa durch Windwurf zu vermeiden. Je nach geforderter Genauigkeit ist dies entweder per Satellit durchführbar, wenn lediglich die horizontale Position sowie die ungefähre Höhe der Vegetation gefordert ist, oder muss per UAV in einer Kamera/LIDAR Kombination erfolgen, um das Blattwerk der Baumkronen von den LIDAR Punkten zuverlässig erfassen zu können. Auch die Sichtprüfungen Bauwerke wie Brücken und Tunnel können grundsätzlich von Drohnen ausgeführt werden, jedoch sind Starrflügeldrohnen hierfür kaum geeignet, da ein Langsamflug in räumlich begrenzter Umgebung notwendig ist, um die Unter- oder Innenseite von Brücken- bzw. Tunnelbauten zu erfassen.

Die elektrische Energieversorgungsinfrastruktur wiederum bietet kaum Gelegenheit für satellitengestützte Inspektionen, da die Auflösung nicht ausreichend ist, um etwa Korrosionsschäden an elektrischen Komponenten zu erkennen. *Zweig und Stephan (2019)* führen unter den sichtinspektionsrelevanten Komponenten insbesondere Fahrdrähte, Halterungen, Isolatoren und Spanngewichte auf. Schnell und mit 100 m Flughöhe vergleichsweise hochfliegende Starrflügeldrohnen werden hier

aktuell als Grenzbereich der technologischen Machbarkeit einer zuverlässigen Erkennung der meisten Fehler eingeschätzt. Besser geeignet könnten VTOL Drohnen sein, welche bei identifiziertem Verdachtsfall in einem zweiten Vorbeiflug kurzzeitig in den Schwebemodus wechseln, um Nahaufnahmen anfertigen zu können. Stromleitungsinspektionen mit Hilfe von LIDAR Punktwolken von Schienenfahrzeugen aus wurden durch *Sánchez-Rodríguez et al. (2019)* erfolgreich demonstriert.

3.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Schienennetze zusammen mit Strom- und Gaspipelinesystemen drei Infrastrukturtypen darstellen, welche jeweils für sich genommen bereits eine kritische adressierbare Marktgröße darstellen. Überlagern sich die Infrastrukturtypen innerhalb eines Betriebsgebietes kann das Marktpotential deutlich ausgeweitet werden, da alle drei Marktsegmente und Kundenzielgruppen ähnliche Sensortechnik an Bord einer unbemannten Trägerplattform erfordern. Eine Sensorsuite bestehend aus einem hochauflösenden Kamerasystem ergänzt um ein LIDAR-System ist in der Lage, über alle drei betrachteten Marktsegmente hinweg einen Großteil der Kundenanforderungen abzudecken. Je nach genauem Inspektionsauftrag des Kunden, können für manche Teilanwendungen im Bereich von Stromleitungen Thermalkameras sowie Kamera-Systeme im Ultraviolettbereich ergänzt werden, insbesondere um Fehlerstellen mit ungewöhnlich hohen Wärmeverlusten sowie coronalen Spannungsentladungen zu identifizieren. Gleiches gilt für ggf. vorhandene elektrische Oberleitungen von Bahnnetzen. Für Erdgaspipelines würde lediglich die luftgestützte Identifikation von Methanleckagen eine Ergänzung der Sensorhardware um Differential Absorption LIDAR erfordern, während Thermal- und UV-Kameras keine Rolle spielen.

Inwiefern es technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist, auch für die infrastrukturenspezifischen Einzelanforderungen eine kommunale Sensorsuite bestehend aus einem Kamerasystem, welches den komplette Spektrum vom thermalen über den visuellen bis in den ultravioletten Bereich abdeckt, ergänzt um hochauflösendes LIDAR sowie differentiell Absorptions-LIDAR zu verwenden, lässt sich nicht pauschal beantworten, sondern ist vom Einzelfall abhängig. Je nach Inspektionshäufigkeit sowie Streckenumfang für die speziellen Anforderungen kann es sinnvoll sein, eine Trägerplattform mit genügend Nutzlastkapazität sowie elektrischer Leistung zu wählen, um standardmäßig zu jeder Mission vollausgestattet aufzubrechen, selbst wenn einzelne Sensoren nicht akut benötigt werden. Sollten die IR, UV und DIAL Daten eine geringe Bedeutung in der Auftragslage aufweisen, wäre es unter Umständen angeraten mit einem kleineren Luftfahrzeug zu agieren und die Sensorsuite zu modularisieren, sodass je nach Mission der Sensorpod gewechselt werden kann. Die hätte zudem dem Vorteil, dass die Schadenshäufigkeit teurer Sensorhardware reduziert werden kann, wenn sie nur bei tatsächlicher Notwendigkeit eingerüstet wird. Da der Fokus dieser Arbeit jedoch nicht die Auslegung

und das Design der Sensorsysteme ist, sondern auf den operativen Untersuchungen liegt, ist vor allem die Feststellung entscheidend, dass signifikante Synergien zwischen den Marktsegmenten bestehen, sowie eine luftgestützte Datenerfassung in erheblichem Umfang technisch möglich ist.

4. Methodik einer System-of-Systems Konzeptionierung für Drohnenbefliegung

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, besteht die Herausforderung bei der Beurteilung verschiedener Optionen zu luft- oder satellitengestützter Fernerkundung darin, keinen direkten Vergleich zwischen den Trägerplattformen selbst anstellen zu können: Trägerplattformen fliegen auf Grund inhärenter Restriktionen wie Reichweite oder Orbitalmechanik nicht in direkt vergleichbarer Weise dieselbe Mission ab. Folglich sind deren Betriebskonzepte, Missionen und daraus resultierende Missionskosten für die jeweilige Infrastrukturgeometrie innerhalb der Anforderungen an die Datenerhebung entscheidend.

Die Anforderungen für die Datenerhebung an die Sensorik wurden in den beiden vorhergehenden Kapiteln ermittelt und mit den Fähigkeiten von Fernerkundungssensorik abgeglichen. Im nun folgenden Kapitel wird davon ausgegangen, dass die eingesetzten Vehikel grundsätzlich geeignet sind. Die Art der mitgeführten Fernerkundungssensorik hat ferner keinen Einfluss auf die Gestalt der Routenführung, welche zur Befliegung der Zielinfrastruktur eingesetzt wird.

Im Folgenden Kapitel wird daher eine modellbasierte Methode zu multiplen Generierung und wirtschaftlichen Optimierung von Inspektionsmissionen auf Basis verschiedener Vehikelrandbedingungen entworfen, mit dem Ziel die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit zur Verfügung stehender Optionen zu bewerten. In Kapitel 4.1 wird hierzu zunächst ein Vehikel-Routen-Generator entworfen, mit dessen Hilfe automatisiert Flugmissionen generiert, hinsichtlich der Befliegungseffizienz optimiert und miteinander verglichen werden können. Aufbauend auf diesen Ergebnissen, beschreibt Kapitel 4.2 das Vorgehen zur wirtschaftlichen Analyse des Gesamtsystems unter Annahme von für das jeweilige System typischen Kostenwerten.

Beide Modelle bilden im folgenden Kapitel 5 die Grundlage zur vergleichenden Analyse bei realen Fallbeispielen.

4.1 Algorithmen der Routenführung und Missionssimulation

4.1.1 Literatur verfügbarer Algorithmen

Aeronautische Navigation im weiteren Sinne beschreibt laut der *Federal Aviation Administration (FAA) of the United States* (2011, S. 2ff.) den Gesamtprozess der Vorflugplanung sowie das Messen und Anpassen von Flugparametern während des Fluges, um dem vordefinierten Flugplan zu folgen. Differenzierter betrachtet werde ersterer Teil der Flugvorbereitung oft als Routenbestimmung oder Routing bezeichnet und gebe eine gewünschte Abfolge von Wegpunkten vor, während letzterer Teil der Regelung von Kurs, Flughöhe, Position und Geschwindigkeit auf taktischer Ebene durch Navigation im engeren Sinne beschrieben werde.

Die engere Unterscheidung erweist sich als nützlich, um geeignete algorithmische Ansätze für die jeweilige Aufgabenstellung zu identifizieren. Die taktische Drohnenavigation während des Fluges nutzt häufig optische Bilderkennung und Fusion mit RADAR, LIDAR und manchmal Ultraschallbilddaten oder globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) zur Orientierung. Hierfür und zunehmend auch für die anschließende Trajektorienplanung sind Deep-Learning-Algorithmen, gemeinhin als KI bezeichnet, das Mittel der Wahl (*Lee et al., 2021; Vetrella et al., 2016*). *Schofield et al. (2020)* beschreiben beispielsweise die taktische Navigation von Multikopter-Drohnen in Relativposition zu Strommasten. Auf der taktischen Ebene der Navigationsaufgabe spielen Flugbahnplanungsalgorithmen, die einer Wegpunktsequenz unter Echtzeit-Flugleistungsbeschränkungen folgen, eine wichtige Rolle.¹

Die Vorflugplanung, im Folgenden auch als *Vehicle Routing* bezeichnet, verwendet üblicherweise kombinatorische Optimierungsalgorithmen zur Lösung von Shortest-Path-Problemen unter bestimmten Luftraumbeschränkungen. Für klassische Transportaufgaben sind dabei Start- und Zielorte fest vorgegeben und es wird die optimale Verbindung zwischen diesen beiden Punkten gesucht. Das in dieser Arbeit vorliegende Problem ist jedoch insofern anders gelagert, als dass jeweils eine Menge an Start-Ziel-Punkten (Betriebsbasen) als gegeben angenommen wird. Diese Betriebsbasen bilden Start- und Endpunkte für einzelne Flüge entlang der Zielfrastruktur.

¹Für die taktischen Navigationsaufgaben sind Sensorkonzepte wie in Kapitel 2 beschrieben zwar ebenfalls von Bedeutung, jedoch liegt der Fokus dieser Arbeit auf der strategischen Ebene der Vorflugplanung und Vehikelauswahl. Die Diskussion von Sensorkonzepten in den Kapiteln 2-3 dient somit vorrangig der grundsätzlichen Eignung bestimmter Trägerplattformen für eine Inspektionsaufgabe hinsichtlich der Anforderungserfüllung zur Datenakquise. Insofern wird das Thema taktische Flugsteuerung sowie hierfür notwendige Sensorik nicht näher betrachtet.

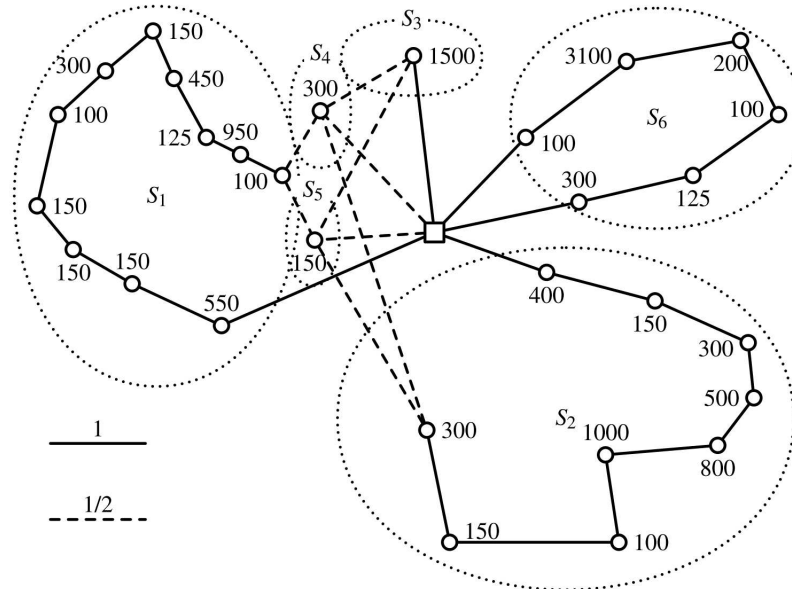


ABB. 4.1: Instanz eines Vehicle Routing Problems (*Toth und Vigo, 2002a, S. 110ff.*)

Dieser Problemtypus ist dem von *Korte und Vygen (2018)* beschriebenen Traveling Salesman Problem (TSP) sehr ähnlich, bei dem ein “Handelsreisender” den kürzesten Weg finden muss, um alle Ziel-“Städte” auf seiner Route zu besuchen, bevor er zu seiner Heimatbasis zurückkehrt. Reichweitenbeschränkungen verkomplizieren das Problem zusätzlich, da die Ziel-“Städte”, in diesem Falle Infrastruktur-Wegpunkte, mit mehreren Flügen (durchgeführt von potentiell unterschiedlichen Luftfahrzeugen) besucht werden müssen. Diese Flugmissionen müssen parallel geplant und gegeneinander optimiert werden, was zu einer TSP-Verallgemeinerung führt, die als Vehicle Routing Problem (VRP) bekannt ist. Eine Instanz eines solchen Problems stellen *Toth und Vigo (2002a)* in Abbildung 4.1 dar. *Wang und Sheu (2019)* beschreiben eine praktische Anwendung der VRP-Problemstruktur im Allgemeinen und im Bereich der unbemannten Luftfahrt im Besonderen beispielsweise im Rahmen der kombinierten LKW- und Drohnenpaketzustellung.

Das Vehicle-Routing-Problem ist nach *Toth und Vigo (2002a)* NP-schwer. Aus informationstheoretischer Perspektive hinsichtlich mathematischer Problemlösung bedeutet dies, dass es mit bekannten Algorithmen schwer ist, Lösungen zu finden, die nachweislich optimal sind, da die Laufzeit der Lösungsalgorithmen mit steigender Anzahl der Eingangsvariablen extrem schnell ansteigt, sodass eine Berechnung in praktisch-endlicher Zeit nicht mehr erfolgen kann. Für Probleme der Klasse NP gibt es für eine postulierte optimale Lösung bestimmter Problemklassen jedoch Algorithmen, mit denen die Optimalität einer Lösung überprüft werden kann.²

²Probleme der Klasse NP, welche sich durch effiziente, schnelle Algorithmen lösen lassen, sind hingegen Teil der Subklasse P. Ob alle NP Probleme, für welche noch keine effizienten Algorithmen bekannt sind, letztendlich in die Klasse P fällt und $P = NP$ gilt, ist noch ungeklärt und

Zur Lösungsfindung selbst jedoch kann auf Algorithmen zurückgegriffen werden, die hinreichend genau darin sind, näherungsweise optimale Lösungen in begrenzter Rechenlaufzeit zu finden. Daher verwendet man für NP-schwere Probleme der kombinatorischen Optimierung, wie dem Vehicle Routing Problem, häufig heuristische Algorithmen, um suboptimale jedoch hinreichend gute Lösungen zu finden (*Korte und Vygen, 2018*, S. 1-8,) sowie (*Sharda et al., 2008*). Neben *branch-and-bound*, *branch-and-cut* und *set-covering* Algorithmen sind klassische Heuristiken und Metaheuristiken unter den grundsätzlich geeigneten Werkzeugen, um generische kapazitiv beschränkte VRPs zu lösen. Nach *Toth und Vigo (2002a)*, Kapitel I und II) wurden klassische Heuristiken vornehmlich zwischen 1960 und 1990 entwickelt und bieten üblicherweise qualitativ gute Lösungen mit moderaten Rechenzeiten, indem sie nur einen begrenzten Teil des möglichen Lösungsraumes absuchen. Auf Kosten längerer Rechenzeiten können Metaheuristiken noch bessere Ergebnisse näher am Optimum liefern, indem sie ausgefeilte Algorithmen der Nachbarschaftsuche oder Rekombination von Teillösungen anwenden.

Innerhalb der Vehicle Routing Heuristiken differenzieren *Toth und Vigo (2002a)* zwischen Algorithmen für die Routen Konstruktion, Routenverbesserung und sogenannten Zwei-Phasen-Algorithmen: Bei letzteren erstellen Routen-Konstruktionsalgorithmen in Phase 1 valide Lösungen bis ein Kapazitätslimit erreicht wird (z.B. die Reichweite eines Luftfahrzeuges) während dabei die Gesamtmissionslänge minimal gehalten wird. In Phase 2 greifen Heuristiken zur Routenverbesserung diese vordefinierten Routen auf und führen Optimierungen innerhalb einer Route (Intra Route Improvement) oder innerhalb einer Menge von Routen (Inter Route Improvement) durch, sodass die Gesamtmissionslänge reduziert wird während die Lösung valide gehalten wird, also keine Zielwegpunkte verloren gehen.

4.1.2 Aufbau verwendeter Algorithmen

4.1.2.1 Formale Problemdefinition

Für diese Arbeit müssen multiple Vehicle Routing Probleme unter jeweils eigenen Randbedingungen (Reichweite, Anzahl sowie Dichte von Operationsbasen) gelöst werden, um zu ermitteln, wie sich diese auf das optimal erreichbare Ergebnis (Missionlänge und schließlich Kosten) auswirken.

Um dies zu erreichen, wird jedes einzelne Vehicle Routing Problem bei gegebener Menge von Basen $|B|$ und einer Drohnenreichweite u auf einem *Graphen* modelliert, wobei die *Kanten* die geodätische Entfernung zwischen Zielwegpunkten der Infrastruktur darstellen, welche wiederum von den *Knoten* des Graphen dargestellt werden. Obwohl diese Arbeit keine Flugbeschränkungszonen aus begründeter operationeller Sicht beinhaltet, könnte die Entfernung zwischen zwei beliebigen

gilt als eine der sieben ungelösten sogenannten Millennium-Probleme der Mathematik (*Carlson et al., 2006*).

Knoten anstelle der Geodäte theoretisch durch individuelle Routenentfernungen ersetzt werden, die alle definierten Flugbeschränkungszonen vermeiden und vorab durch Wegfindungsalgorithmen bestimmt wurden. Die Kanten werden *ungerichtet* modelliert, d. h. die “Kosten” oder Entfernung zu einem bestimmten Wegpunkt sind die gleichen wie in die entgegengesetzte Richtung.³ Die Ziele werden von einer *Flotte* von *Vehikeln* / *Drohnen* abgeflogen, die einem *Depot* (auch als *Operationsbasis* bezeichnet) zugeordnet sind. Da die hier modellierte Flugmission nicht dem Transport von Gütern, sondern der Durchführung von Sensoraufgaben dient, wird die *Kapazität* des Vehikels in diesem Falle durch seine Reichweite u definiert, die es fliegen kann, bevor es zur Basis zurückkehren muss.⁴

Modelliert wird das Optimierungsproblem mit folgenden Variablen:

- Menge aus Inspektionszielen (T)
- hypothetische Drohnenreichweite (u)
- Menge an Operationsbasen (B)
- Menge hypothetischer Drohnenreichweiten (U)
- Route eines UAV als Einzelflug (r)
- Menge aller Route in einer Mission (R)
- Gesamtmissionlänge bestehend aus mehreren Flügen (l)
- Einsparung an Missionslänge durch Routenzusammenlegung (s)

Das Optimierungsproblem bestimmt sich also wie folgt:

Gegeben seien eine Menge aus Inspektionszielen T , hypothetischen Drohnenreichweiten $u \in U$ und eine Menge an Operationsbasen B .

Zu lösen ist für jedes Tupel (B, u_v) : Der Graph $G = (V, V \times V)$ besitzt Knoten, die sowohl aus den Zielwegpunkten wie auch den Operationsbasen bestehen, d.h. $V = B \cup T$. Die Entfernungsfunktion zwischen den Knoten sei $d : V \times V \mapsto \mathbb{Q}_{\geq 0}$.

Gesucht sind m Routen $R_i = (r_{i,1}, r_{i,2}, \dots, r_{i,|R_i|})$ über Knoten von G , d.h. $r_{i,j} \in V \quad \forall \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq |R_i|$, sodass der jeweils erste wie auch letzte Knoten der Route eine Operationsbasis ist, d.h. $r_{i,1} = r_{i,|R_i|}$ und $r_{i,1} \in B$. Die Länge einer

³Theoretisch könnten gerichtete Kanten jedoch sinnvoll sein, wenn man Gegen- oder Rückenwindbedingungen modellieren möchte, welche den Energie- bzw. Zeitaufwand und damit die Reichweite je nach Flugrichtung beeinflussen. Dies ist gegebenenfalls sogar zeitvariant vorstellbar.

⁴Hierbei gilt die Annahme, dass das Vehikel über ausreichend Nutzlast Tragkraft verfügt, um die Sensorik mitzuführen.

jeden Route wird limitiert durch die Reichweite der verwendeten Drohnen (vgl. Gleichung 4.2). Gleichung 4.3 stellt sicher, dass alle Zielwegpunkte abgedeckt werden. Ziel ist es, die Gesamtmissionslänge ℓ zu minimieren (Gleichung 4.4).

$$\min \ell \quad \text{während:} \quad (4.1)$$

$$\sum_{j=1}^{|R_i|} d(r_{i,j}, r_{i,j+1}) \leq u \quad (4.2)$$

$$\{r_{i,j} | 1 \leq i \leq m, 2 \leq j < |R_i|\} = T \quad (4.3)$$

$$\sum_{1 \leq i \leq m} \sum_{1 \leq j < |R_i|} d(r_{i,j}, r_{i,j+1}) \leq \ell \quad (4.4)$$

Für verschiedene Positionen von Operationsbasen B und Drohnenreichweiten u , werden optimierte Missionslängen $\ell_{B,u}$ erzielt. Diese können anschließend analysiert werden, um Stärken und Schwächen von dichten oder spärlichen Konfigurationen an Operationsbasen aufzudecken, sowie den Wert inkrementeller Drohnenreichweite im jeweiligen Kontext zu bestimmen. In einem weiteren Schritt wird für jede Operationsbasis B und Drohnenreichweite u die benötigte Vehikelanzahl ermittelt, welche unter Berücksichtigung der maximalen Jahresflugleistung notwendig ist, um das Befliegungsvolumen abzudecken.

4.1.2.2 Algorithmischer Ansatz

Die beiden in Kapitel 5 herangezogenen Datensätze zur beispielhaften Abwägung von Vor- und Nachteilen zwischen verschiedenen Drohnensystemkonfigurationen umfassen jeweils eine erhebliche Anzahl an Zielwegpunkten: Der *GEO-Kilometer*-Datensatz für die Schieneninfrastruktur der Deutschen Bahn (vgl. Anwendungsfall in Kapitel 5.1) besteht aus ca. 34.000 Wegpunkten, die sich auf ca. 34.000 Schienenkilometer und eine Gesamtfläche von ca. 350.000 km² erstrecken (*DB Netz AG, 2019*). Der Datensatz zur US-Fernleitungspipeline (vgl. Anwendungsfall in Kapitel 5.2) ist mit über 190.000 Wegpunkten auf einer Fläche von über 8 Mio. km² sogar noch umfangreicher (*U.S. Energy Information Administration, 2018*). Dies macht performante Algorithmen notwendig, welche große Probleme in endlicher Zeit berechnen können.

Bei einer sechsstelligen Anzahl von Knoten im Gesamtgraphen wurden die Algorithmenklassen Branch-and-Bound, Branch-and-Cut und Set-Covering als zu rechenintensiv eingeschätzt, um praktikabel zur parallelen Lösung multipler VRPs eingesetzt zu werden. Daher wendet diese Arbeit Heuristiken an, um die Gesamtmissionslänge $\ell_{B,u}$ als Kompromiss zwischen Lösungsqualität und Rechenlaufzeit zu minimieren. Da der heuristische Ansatz augenscheinlich bereits stichprobenartig qualitativ gute Ergebnisse lieferte, erschien eine rechenintensivere Metaheuristik nicht notwendig.

In Abbildung 4.2 wird der schematische Aufbau des konstruierten Routenfindungsalgorithmus dargestellt und im Folgenden genauer erläutert:

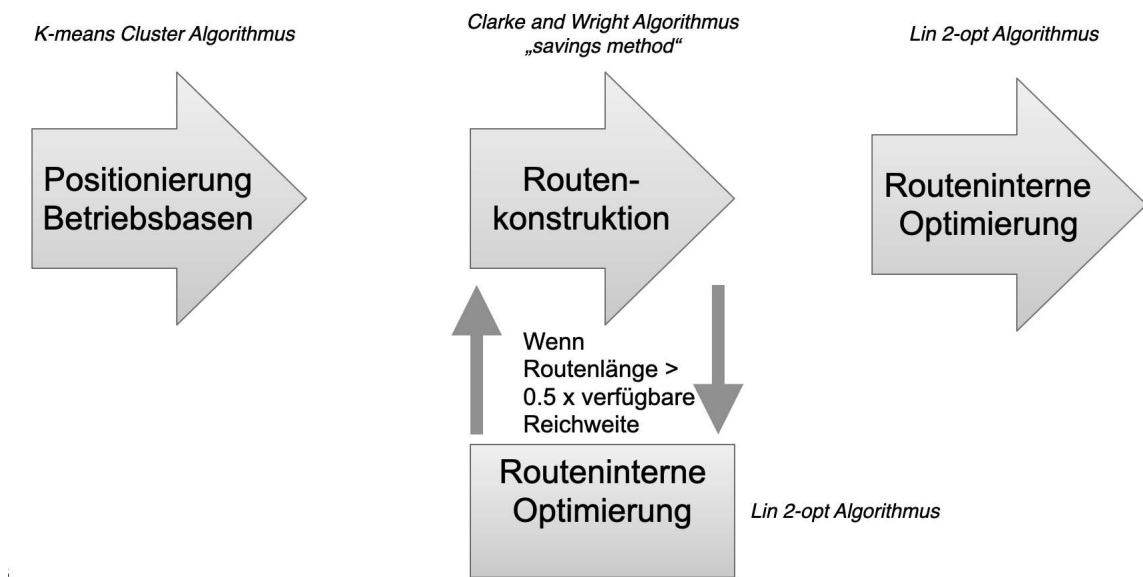


ABB. 4.2: Flowchart des erstellten Algorithmus zur Routenoptimierung

Ist die Routenfindung selbst abgeschlossen, so wird für jede Operationsbasis auf Grundlage des gefundenen Routenumfanges und der sich hieraus ergebenden Flugtage, der Befliegungshäufigkeit, sowie der zur Verfügung stehenden Flugtage je Vehikel, die erforderliche Vehikelanzahl berechnet, welche vor Ort stationiert werden muss, um alle Missionen abzuarbeiten.

1. Positionierung der Betriebsbasen Während in der Realität die geografischen Standorte von Betriebsbasen durch verfügbare Grundstücke eingeschränkt sein können, wird die Menge der Betriebsbasen B in dieser Arbeit durch einen *k-means Clusteralgorithmus* bereitgestellt. Die Basen werden somit in geographische Schwerpunkte der Menge der Zielwegpunkte T platziert. Für eine detaillierte Beschreibung des k-means-Algorithmus im Allgemeinen siehe (*MacKay, 2011, S. 284ff.*). Dies ist notwendig, um eine skalierbare Methode zur Generierung generischer Basen zu erhalten, welche allerdings nicht die tatsächliche Eignung des Grundstückes selbst überprüfen kann, sondern lediglich eine angenäherte Position der Betriebsbasis liefert.

Um die durchschnittliche Rechenzeit der VRPs (insbesondere bei größeren Basenzahlen) weiter zu beschleunigen, wird der Gesamtgraph entlang jeder Betriebsbasis in einen Teilgraphen mit der jeweiligen Untermenge von Zielen T_{base} aufgeteilt. Dies reduziert die Größe der Distanzmatrix ($O(n^2)$) sowie die Laufzeit von *Routenkonstruktion* und *Zwischenoptimierung* (beide $O(n^2)$). Während die Unterteilung in

mehrere kleinere Probleme aufgrund der superlinearen⁵ Zeitkomplexität des Lösungsalgorithmus an sich schon zu kürzeren Laufzeiten führt, lassen sich durch die parallele Berechnung einzelner Teillösungen weitere Leistungssteigerungen realisieren.

2. Routenkonstruktionsheuristik Um Routen für die VRP-Lösung zu konstruieren, verwendet diese Arbeit den *Clarke-und-Wright-Algorithmus*, wie ihn [Clarke \(1964\)](#) beschreibt, da dieser eine quadratische und damit praktikable Laufzeit aufweist sowie auf Grund seiner Implementierbarkeit als gute Ausgangsbasis für einen komplexeren algorithmischen Aufbau geeignet ist. Der Clarke-Wright-Algorithmus, auch als *Savings-Methode* bekannt, wird initialisiert, indem elementare Einzelrouten ausgehend von der Basis b zu jedem der zugewiesenen Ziele erstellt werden. Diese Routen (b, \dots, i, b) und (b, j, \dots, b) werden dann iterativ zu größeren Routen $(b, \dots, i, j, \dots, b)$ zusammengeführt solange die resultierende Route keine Randbedingungen (wie die maximale Drohnenreichweite oder einen parametrisch vorzugebenden Anteil davon) verletzt. Die Wegpunktfolgen innerhalb jeder Teilroute wird bei den Zusammenlegungsschritten nicht geändert.

Die nächsten zusammenzuführenden Routen werden nach der durch eine mögliche Zusammenlegung größten erzielbaren Einsparung an Gesamtroutenlänge ausgewählt. Zur Vorbereitung Routenauswahl für die Verkettung werden zunächst alle theoretischen Einsparungen zwischen allen Zielen i, j berechnet und in einer Prioritätswarteschlange gespeichert, die als höchste Priorität die größten Einsparungen gemäß $s_{ij} = d(i,b) + d(j,b) - d(i,j)$ aufweist. Aus der Prioritätswarteschlange werden anschließend nur Paare als valide betrachtet, deren Elemente jeweils ein erstes und/oder letztes Ziel innerhalb einer Route darstellen, zumal eine Verkettung von Zwischenzielen innerhalb einer Route nicht ausgeführt werden kann.

Da der Ansatz mit zentraler Prioritätswarteschlange für Einsparungen vor jedem iterativen Verkettungsschritt ständig alle aktuellen Routen hinsichtlich der größten Einsparung betrachtet und dann aus dieser Gesamtmenge lediglich zwei Routen zur Verkettung auswählt, wird diese Variante als *parallele Version* des Clarke- und Wright-Algorithmus bezeichnet. Die *sequentielle Version*, bei der eine einzelne Route sukzessive mit immer mehr elementaren Routen zusammengeführt wird, wird von [Toth und Vigo \(2002b\)](#), S. 110ff.) als unterlegen hinsichtlich der Lösungsqualität angesehen.

3. Routeninterne Optimierung Aus der Routenkonstruktion resultierende Verkettungen zwischen den Start- und/oder Endzielen bestehender Routen können jedoch zu suboptimalen Sequenzen innerhalb der zusammengeführten Route

⁵d.h. schneller skalierend als linear

führen. Dies erfordert einen zusätzlichen Routenoptimierungsalgorithmus, um die Abfolge von Zielen innerhalb jeder Route zu optimieren.

Hierzu wurde der von [Lin \(1965\)](#) entwickelte λ -opt Algorithmus verwendet. Es werden in jeder Iteration λ Kanten der Route entfernt und die verbleibenden Teilsequenzen auf Wiederverbindungsöglichkeiten geprüft, welche die Gesamtroutenlänge verkürzen. Auch beim λ -opt-Algorithmus gibt es verschiedene Varianten, die [Toth und Vigo \(2002c, S. 121f.\)](#) beschreiben: Innerhalb jeder Iteration kann entweder der beste Kantentausch aller möglichen Kantentausche im aktuellen Zustand der Route durchgeführt werden oder der erste Tausch, welcher eine Verbesserung bewirken würde (“greedy” Strategie). Darüber hinaus werden die Kantentupel für potenzielle Vertauschungen entweder global über die gesamte Route oder nur lokal dort gesucht, wo vorteilhafte Vertauschungen am wahrscheinlichsten sind.

Da eine globale Suche sehr rechenintensiv ist und die Lösungsqualität nur begrenzt verbessert wird, wird in dieser Arbeit als Kompromiss eine 2 -opt-lokale Suche verfolgt, bei der eine Nachbarschaftsentfernung definiert wird, die den maximalen Suchabstand zwischen zwei zu vertauschenden Kanten vorgibt. In jeder Iteration wird dann der bestmögliche Tausch implementiert. Darüber hinaus wird die maximale Anzahl von Iterationen begrenzt, da ein deutlich abnehmender Grenznutzen gegen Ende des Optimierungslaufes zu beobachten ist, wenn sich der Algorithmus dem lokalen Optimum bereits stark angenähert hat.

Rechenintensivere Varianten der Routenoptimierung arbeiten mit höheren Werten für λ , was die Lösungsqualität auf Kosten einer größeren Zeitkomplexität $O(n^\lambda)$ verbessert. [Lin und Kernighan \(1973\)](#) schlagen einen *variable-opt*-Algorithmus vor, der λ dynamisch anpasst. Dies ermöglicht eine hohe Lösungsqualität bei gleichbleibender Rechenleistung. Dies stellt künftig eine weitere mögliche Verbesserung der Lösungsgenauigkeit dar, wurde jedoch zunächst nicht implementiert, da die mit dem 2-opt-Algorithmus erzielten Ergebnisse bereits sehr zufriedenstellend waren.

4. Alternierende Routenkonstruktion und Routenoptimierung Bei der sequentiellen Routenkonstruktion und anschließenden Routenoptimierung wurde schnell deutlich, dass dies dazu führt, dass die verfügbaren Drohnenreichweiten nicht voll ausgenutzt werden, da die Routenverkettung die Randbedingung durch noch nicht optimierte Routen unnötig früh verletzt. Sollen beispielsweise zwei Routen mit einer Routenlänge von je 55% der maximalen Reichweite zusammengefügt werden, ist dies nicht mehr möglich und die Zusammenlegung stoppt regelmäßig bereits knapp oberhalb der halben maximalen Reichweite. Daher wurde der Ansatz implementiert, beide Schritte miteinander zu verflechten: Jedes Mal, wenn eine Iteration der Routenkonstruktion eine neue verkettete Route erzeugt, die länger

als das 0,5-fache der verfügbaren Reichweite ist, wird eine vollständige routeninterne Optimierung durchgeführt. Zusätzlich wird nach Abschluss der Routenverkettungen insgesamt unabhängig von diesem Kriterium erneut eine routeninterne Optimierung angewendet, um auch kleinere, noch nicht optimierte Strecken zu verbessern.

Bei dieser Variante der Zwischenoptimierung kann es jedoch vorkommen, dass Ziele aus einer Wegpunktsequenz innerhalb einer Route auf das erste oder letzte Ziel der verbesserten Route verlegt werden. Da der Clarke-Wright-Routenkonstruktionsalgorithmus innere Routenziele während des Auswahlprozesses der nächsten Verkettung überspringt, ist es möglich, dass das neue End- oder Startziel der Route eine jetzt gültige Verkettungskombination darstellt, nachdem es bereits vor einer Zwischenoptimierung übersprungen wurde. Daher muss das Wegpunkttripler erneut in die Savings-Prioritätswarteschlange eingefügt werden.

Das Durchlaufen der hier beschriebenen Teilalgorithmen 1 bis 4 liefert für eine bestimmte Kombination an Randbedingungen (verfügbare Drohnenreichweite und Anzahl verfügbarer Betriebsbasen) eine valide und optimierte Lösung, welche in den Lösungsraum verschiedener UAV-Konfigurationen aufgenommen wird und dieser anschließend im Kostenmodell des Folgekapitels weiterverarbeitet werden kann.

4.2 Kostenmodell für Drohnen System-of-Systems

Im folgenden Kapitel wird ein Kostenmodell entworfen, mit dessen Hilfe ein Gesamtkostenansatz für eine je einmalige Datenerfassung der betrachteten Zielfrastruktur ermittelt werden kann. Dies erfolgt unter Betrachtung der Sensitivitäten der Missionslängendifferenzen resultierend aus dem Modell zur Routenführung und Missionssimulation in Kapitel 4.1 und mittelbar hierdurch auch der Fähigkeiten und Konfigurationen der eingesetzten Lufttransportsysteme hinsichtlich Reichweite und Dezentralität der Betriebsbasen.

Die Struktur des Kostenmodells ist dabei innerhalb der Lufttransportsysteme technologieagnostisch gehalten und für verschiedene in Frage kommende Gesamtsysteme analog anwendbar konstruiert, sodass eine möglichst direkte Vergleichbarkeit erreicht wird. Kapitel 4.2.1, 4.2.2 sowie 4.2.3 untersuchen hierbei Arten von Luftfahrtsystemen mit strukturell unterschiedlicher Kostenzusammensetzung, welche sich aus dem jeweiligen Betriebskonzept ergibt und dadurch auf Personal- und/oder Kapitalintensität niederschlägt.

Bei all diesen Varianten werden dabei stets nur die Kosten für die Datenakquise im Zuge der Inspektion selbst berücksichtigt, nicht jedoch die Auswertung der

Daten zur Extraktion für den Anwender weiterverwertbarer Informationen. Dieses Vorgehen wird vor dem Hintergrund der Annahme gewählt, dass sich die gewählte Methode zur Datenakquise nicht auf den Aufwand zur Auswertung auswirkt und somit keine Notwendigkeit zur Modellierung besteht, um die relative Vorteilhaftigkeit zwischen den zur Verfügung stehenden Optionen besteht. Die grundsätzliche Eignung einer Datenakquisemethode muss jedoch gegeben sein und wird qualitativ in Kapitel 3 für einzelne Anwendungsfälle bewertet.

Eine Anforderung an die Datenakquise ist hierbei die kurzfristige Verfügbarkeit eines Fluges innerhalb von 24 Stunden nach Anforderung. Dies leitet sich ab aus den in Kapitel 3 aufgezeigten Notwendigkeiten zur Identifikation und Analyse von Schadensbildern an Infrastruktur im Störfall ab, da hier möglichst zeitnah eine größere Strecke untersucht werden muss, um alle Schäden zu identifizieren und anschließend beheben zu können. Für die luftgestützten Methoden zur Datenakquise folgt daraus die Randbedingung, dass UAV Systeme im Einsatzkonzept nicht zwischen Standorten verlegt werden dürfen, da stets eine möglichst durchgehende Verfügbarkeit gewährleistet sein muss, welche durch Verlegezeiten negativ beeinflusst werden würde. Es wird ferner davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit für hochprioritäre Mission gewährleistet ist, wenn ein Vehikel einer Basis zugeordnet ist. Des Weiteren würden durch eine Verlegung von UAV Teams zwischen Betriebsbasen weitere Kosten entstehen durch Hotelübernachtungen, Transportfahrzeuge und Personalaufschläge für regelmäßige Arbeiten weit entfernt vom Wohnort. Neben dem Kostenaspekt wäre auch die betriebliche Praktikabilität hinsichtlich der gesteigerten Komplexität der Betriebsprozesse höchstfragwürdig und würde zu vermehrten Ausfallzeiten führen.

Als Ausgangspunkt für die Kostenmodellierung dient das Drohnenmodell S360Mk.II von Hanseatic Aviation Solutions GmbH mit folgender Spezifikation⁶:

- Nutzlastgewicht > 5 kg, Nutzlastvolumen ca.17 l
- Spannweite 3.6m
- Maximale Abflugmasse (MTOM) $\leq 25 - 30$ kg
- Flugeschwindigkeit 80 - 140 km/h
- Modulares Nutzlastkonzept
- Max. Flugdauer 3 h bei 100 km/h, 7 h in der BOS-Variante
- robuster 2-Takt Verbrennungsmotor
- Stromerzeugung an Bord für die Systeme (350 W), optional

⁶S360Mk.II wurde aufgrund der Beteiligung im Forschungsverbundprojekt gewählt



ABB. 4.3: Starrflügel UAV mit herkömmlichem Fahrwerk auf einer befestigten Landebahn (*Hanseativ Aviation Solutions, 2022*)

- Verschiedene Kommunikationstechnologien (DDL, 433- 2400 MHz, Iridium Certus) mit hoher Datenverschlüsselung
- Navigations- und Anti-Kollisionslichter
- Offene Autopiloten-Architektur

4.2.1 Starrflügel UAV - teilautomatisierter Betrieb

Als erster Systemtyp wird ein klassisches Starrflügel UAV der Größenklasse bis 25 kg mit herkömmlichem Fahrwerk betrachtet, welches von einer befestigten oder unbefestigten Start- und Landebahn aus betrieben wird, wie in Abbildung 4.3 dargestellt. Dies erfolgt in der Regel von Flugplätzen aus, auf welchen hauptsächlich bemannter Flugverkehr der allgemeinen Luftfahrt abgewickelt wird. Der Umstand des kombinierten bemannten und unbemannten Flugverkehrs macht es nach einer TÜV Analyse notwendig, den Piloten und einen zweiten Sicherheitspiloten vor Ort auf dem Flugplatz zu haben, da ein Situationsbewusstsein und Konfliktvermeidung im Nahbereichsluftraum des Flugplatzes und während des Taxiings anderweitig nicht hinreichend sichergestellt werden kann. Des Weiteren erfordert der Turnaround also das Auftanken und Vorbereiten des Luftfahrzeuges in diesem Konzept Personaleinsatz vor Ort. Der eigentlich Flugbetrieb während der Cruise-Phase erfolgt dennoch weitestgehend automatisiert.

4.2.1.1 Betriebskonzept und Personalkosten

Das Betriebskonzept sieht aus den genannten Gründen vor, dauerhaft zwei Vollzeitäquivalente als Betriebspersonal an jeder Betriebsbasis zu stationieren. Zusätzlich werden für die Betriebsführung, für Koordination und Administration von Betriebspersonal und Flugmissionen zwei Vollzeitäquivalente in einem zentralen Kontrollzentrum vorgesehen. Des Weiteren ist das zentrale Kontrollzentrum zuständig für die externe Beauftragung von heavy maintenance Vorgängen sowie die technische Koordination und Beschaffung für die Drohnenflotte.

Als Grundvoraussetzung für eine Befliegung mit derart großen Reichweiten wird eine Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) Befliegung angenommen, da ein Visual Line of Sight (VLOS) Flug schon mit wenigen Kilometern Operationsradius völlig undenkbar ist.

Für die Anzahl der Flugtage je Betriebsbasis sind einerseits die Verfügbarkeit des Betriebspersonals und andererseits Einschränkungen durch Wetter entscheidend. Unter Berücksichtigung von Urlaubstagen, Wochenenden und Feiertagen ergeben sich für Deutschland je nach Bundesland und Jahr im Durchschnitt ca. 225 Arbeitstage je Kalenderjahr. Hiervon müssen jedoch durchschnittlich 11 Krankheitstage (*Statista, 2022*) je Jahr abgezogen werden, sodass als Zwischenergebnis 214 Tage verbleiben. Von diesen wiederum fallen weitere Tage aufgrund schlechten, für Flugmissionen ungeeigneten Wetters, sowie Tage für Wartungsarbeiten, welche nicht vollständig während der Schlechtwettertage durchgeführt werden, und technische Defekte weg. Die Anzahl der Flugtage wird im Hinblick auf diese Nichtverfügbarkeiten auf netto 180 Tage im Jahr festgesetzt.

TAB. 4.1: Annahmen zu Personalkosten

Annahme	Wert
Arbeitgeberbruttogehalt für Betriebspersonal	60.000 €
Vollzeitäquivalente je Betriebsbasis	2
Vollzeitäquivalente im zentralen Kontrollzentrum	2
Flugtage je UAV p.a.	180

4.2.1.2 Kapitalkosten und Auslastung

Die Investitionsausgaben für ein Starrflügel UAV der Klasse bis 25 kg inklusive Sensorik werden mit 100.000 € je Stück angesetzt. Öffentlich zugängliche oder pauschale Preisinformationen sind hierfür nicht verfügbar. Jedoch konnte durch anonymisierte Rücksprache mit Anbietern ein realistisches Preisniveau validiert werden.

Der wirtschaftliche Abschreibungszeitraum wird mit 3 Jahren angesetzt, da es sich bei Drohnen um Systeme mit rapider Technologieentwicklung und damit technologischer Obsoleszenz handelt. Des Weiteren sind die Systeme im Dauereinsatz starken Witterungseinflüssen und Verschleiß ausgesetzt. Insofern wären längere Abschreibungszeiten nicht rechtfertigbar.

Ein weiterer entscheidender Einflussfaktor ist die Auslastung des Gesamtsystems, welches je nach Konfiguration aus mehreren Betriebsbasen besteht. Wie oben dargestellt, wird die ständige Verfügbarkeit mindestens eines Drohnensystems je Betriebsbasis vorausgesetzt, um schnell auf Kundenanfragen reagieren zu können. Insofern bestimmt sich die jährliche Mindestkapazität der Gesamtsystemkonfiguration aus der Anzahl der Betriebsbasen und den zur Verfügung stehenden

Flugtagen je Vehikel sowie der Cruise-Geschwindigkeit. Letztere bestimmt sowohl, wie viele Infrastrukturkilometer je Flugstunde abgeflogen werden können als auch vorher bereits innerhalb der Missionsplanung, wie groß die maximal untersuchte Routenlänge unabhängig von der technischen UAV-Reichweite ist, da diese vom verfügbaren Tageslicht begrenzt wird.

TAB. 4.2: Annahmen zu Kapitalkosten

Annahme	Wert
UAV Investitionsausgaben	100.000 €
UAV Abschreibungszeitraum	3 Jahre
Vehikel-Flugtage aus anderen Missionen p.a.	500
Cruise Geschwindigkeit	115 km/h

4.2.1.3 Wartung und Verbrauchsmaterial

Das Wartungskonzept im Modell wurde in Rücksprache mit Hanseatic Aviation Solutions, einem Betreiber von Starrflügeldrohnen, entwickelt und gliedert sich in drei wesentliche Kostenbestandteile: Ersatzteile, Light Maintenance und Heavy Maintenance.

Der Bedarf an Ersatzteilen wird zunächst je Flugstunde und unabhängig von den eigentlichen Wartungsintervallen modelliert. Wenngleich der tatsächliche Bedarf stochastischen Schwankungen unterworfen ist, sowie von den tatsächlichen, insbesondere witterungsabhängigen Einsatzbedingungen abhängt, so wurde der durchschnittliche Bedarf mit $\frac{1}{10.000}$ der Investitionsausgaben je Flugstunde veranschlagt.

Die Lohnkosten für Wartung werden im Kostenmodell je nach Art des Wartungsereignisses getrennt betrachtet. Light Maintenance beinhaltet pre flight checks, Motorölung, Funktionsprüfung der Flugsteuerung, Prüfung auf Beschädigungen am Fluggerät, sowie sämtliche Reparaturen, welche vom Betriebspersonal vor Ort durchgeführt werden können. Das Wartungsintervall für Light Maintenance Ereignisse wird mit 50 Flugstunden veranschlagt. Jedoch ist das Betriebskonzept im Falle des von den Betriebsbasen aus gesteuerten manuellen Betriebes der UAVs dahingehend kostenoptimiert, dass das vor Ort anwesende Betriebspersonal diese Arbeiten selbst durchführt und somit keine variablen Kosten entstehen. Freie Personalkapazitäten hierfür sind während der Flugzeiten der UAVs vorhanden, da intensive Arbeitsbelastung vornehmlich zum Turnaround der Luftfahrzeuge sowie während der Start- und Landephase anfällt und der Betrieb während der Cruise-Phase weitestgehend automatisiert erfolgt, sodass einer der beiden Mitarbeiter*innen für Wartungstätigkeiten zur Verfügung steht.

Deutlich umfangreichere Heavy Maintenance Wartungsereignisse können jedoch auf Grund des höheren Zeitaufwands sowie der benötigten umfangreicheren Qualifikationen nicht vom Betriebspersonal vor Ort durchgeführt werden. Heavy Maintenance enthält eine vollständige Zerlegung und Überprüfung des Motors sowie

sämtlicher Aktuatoren der Flugsteuerung und der Sensornutzlast inklusive des Austausches von Verschleißteilen, welche als Ersatzteile je Flugstunde veranschlagt werden. Deshalb werden alle 150 Flugstunden acht Wartungsstunden veranschlagt, die von einem externen Dienstleister zu je 150 € je Stunde durchgeführt werden.

Darüber hinaus werden Hilfs- und Betriebsstoffe wie beispielsweise Treibstoff, Strom und Schmierstoffe als Verbrauchsmaterial mit 6 € je Flugstunde veranschlagt.

TAB. 4.3: Annahmen zu Wartung und Verbrauchsmaterial

Annahme	Wert
Ersatzteile je Flugstunde	<i>Investitionsausgaben</i> 10.000
Kosten je Wartungsstunde	150 €
Wartungsintervall Light Maintenance	50 Flugstunden
Kosten für Light Maintenance	0 € (Fixkosten für Betriebspersonal)
Wartungsintervall Heavy Maintenance	150 Flugstunden
Wartungsaufwand Heavy Maintenance	8 Wartungsstunden
Verbrauchsmaterial (Energie und Schmierstoffe)	6 € je Flugstunde

4.2.2 Starrflügel UAV - hochautomatisierter Betrieb

Das zweite untersuchte Gesamtsystemkonzept beinhaltet einen wesentlich höheren Automatisierungsgrad und dadurch geringere Anteile an Personalkosten. Es ist als eine Weiterentwicklung des in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Starrflügel Gesamtsystems zu verstehen, bei welchem der Turnaround, also das Betanken und Vorbereiten des Luftfahrzeuges, sowie der Start- und Landevorgang automatisiert wurde und somit kein Betriebspersonal dauerhaft vor Ort benötigt wird.

Als konkretes Beispiel für ein solch hochautomatisiertes UAV-System dient das ElektRail System, welches von *mb+ Partner* (2022) entwickelt wird. Es handelt sich dabei um ein Schienensystem mit beweglicher Schlittenvorrichtung, auf welchem ein UAV wie in Abbildung 4.4 gezeigt, aufsetzt. Abbildung 4.5 verdeutlicht die Bewegungsachsen und Freiheitsgrade Schlittens: Beim Landeanflug synchronisiert dieser elektromechanisch aktuiert mit dem Gierwinkel und Bewegungsvektor des UAV sowohl longitudinal wie auch transversal. Zusätzlich gibt es Konzeptvarianten, in denen die mechanische Schnittstelle einen weiteren vertikalen Freiheitsgrad erhält, um die relative Sinkgeschwindigkeit zusätzlich beeinflussen zu können. Beim Startvorgang agiert das System im Wesentlichen wie ein Katapult und gibt das UAV nach unterstütztem Beschleunigungsvorgang zum Abheben frei.



ABB. 4.4: ElektRail Start- / Landesystem (Prototyp) mit UAV

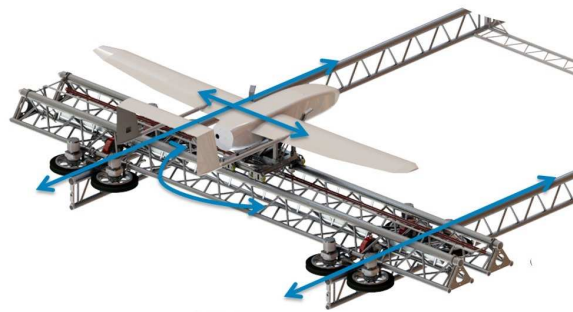


ABB. 4.5: Funktionsweise eines ElektRail Start- / Landesystems

Während mit einem solchen System auch gewisse Vorteile beim Maximum Take Off Weight (MTOW) durch die Elimination des Fahrwerkes von der UAV-Strukturmasse mit sich bringt, ist von operativer Bedeutung vor allem die Entkopplung des Basenbetriebes von Flugplätzen der bemannten Luftfahrt, da durch ein derartiges Start- / Landesystem keine feste Landebahn mehr benötigt wird. Dies entschärft die Konfliktvermeidung zwischen Vehikeln bzgl. Bahnbelegung und Taxiing erheblich, sodass aus Gründen des Situationsbewusstseins keine Notwendigkeit mehr besteht, Piloten vor Ort zu haben. Des Weiteren ist der Flächenbedarf einer solchen Startvorrichtung erheblich geringer als der einer konventionellen Landebahn, was eine Einzäunung und kamerabasierte Überwachung des Geländes wirtschaftlich tragfähig macht, wodurch unbefugter Zutritt Fremder sowie Hindernisse durch Wildtiere ausgeschlossen werden können, welche andernfalls nur durch Personal vor Ort erkannt werden könnten.

Auch kann mit einem solchen System der Turnaround deutlich einfacher automatisiert werden, da das Luftfahrzeug auf der Schnittstelle des Start- / Landesystems im Gegensatz zum konventionellen Fahrwerkansatz sehr exakt positioniert werden kann. Dies erleichtert die Integration einer automatischen Betankungseinheit für Verbrennungsmotoren bzw. Batterieladesystems für Elektromotoren sowie nachrangig auch von kamerabasierten Systemen zur Zustandsüberprüfung für die Flugvorbereitung erheblich.

4.2.2.1 Betriebskonzept und Personalkosten

Im Unterschied zum teilautomatisierten System in Kapitel 4.2.1 wird je Betriebsbasis in diesem hochautomatisierten Szenario also kein permanent anwesendes Personal mehr vorgesehen. Gleichwohl ist für Fehlerfälle Personal zum Entstören notwendig, welches nun allerdings mehrere Betriebsbasen gleichzeitig betreuen kann. Um einen weiterhin hohen Verfügbarkeitsgrad sicherzustellen, wird daher die Annahme getroffen, dass je fünf Betriebsbasen ein Mitarbeiter in Bereitschaft notwendig ist, um kurzfristig Reparaturen durchführen oder sonstige Störungen

beseitigen zu können sowie eine sichere Betriebsüberwachung gewährleisten zu können.

Die Annahmen zu Personalkosten, Personalbedarf im Kontrollzentrum sowie den jährlichen Flugtagen bleiben unverändert zum obigen Baseline Szenario.

TAB. 4.4: Annahmen zu Personalkosten

Annahme	Wert
Arbeitgeberbruttogehalt für Betriebspersonal	60.000 €
Vollzeitäquivalente je Betriebsbasis	0,2
Vollzeitäquivalente im zentralen Kontrollzentrum	2
Flugtage je UAV p.a.	180

4.2.2.2 Kapitalkosten und Auslastung

Gegenüber dem Baseline System kommen hinsichtlich Kapitalkosten und Auslastung die Investitionen und Abschreibungen für das Start- / Landesystem sowie das Automationssystem für den vollautomatischen Turnaround inkl. Betankung und Kameraüberwachungssysteme hinzu. Die Investitionsausgaben wurden mit *mb+ Partner (2022)* auf 135.000 € für das Start- Landesystem sowie 25.000 € für das Automationssystem abgeschätzt. Da das Start- / Landesystem für eine große Bandbreite an Starrflügel UAV geeignet ist und mit der mechanischen Schnittstelle auf modernisierte Luftfahrzeuge umgerüstet werden kann, wird hier eine deutliche längere Lebens- und Abschreibungsdauer von 7 Jahren angenommen.

Investitionsausgaben für das UAV werden trotz eingespartem Fahrwerk unverändert angenommen, ebenso die Vehikel-Flugtage aus anderen Missionen und Cruise-Geschwindigkeit.

TAB. 4.5: Annahmen zu Kapitalkosten

Annahme	Wert
Investitionsausgaben UAV	100.000 €
Investitionsausgaben Launch / Landing System	135.000 €
Investitionsausgaben Automatisierung des Turnarounds	25.000 €
Abschreibungsdauer UAV	3 Jahre
Abschreibungsdauer Launch / Landing System	7 Jahre
Abschreibungsdauer Automatisierung des Turnarounds	7 Jahre
Vehikel-Flugtage aus anderen Missionen p.a.	500
Cruise Geschwindigkeit	115 km/h

4.2.2.3 Wartung und Verbrauchsmaterial

Das Wartungskonzept für die Luftfahrzeuge entspricht im Wesentlichen dem teilautomatisierten Konzept aus Kapitel 4.2.1. Das Entstörpersonal wird mit einer

Wartungsperson je 5 Betriebsbasen angenommen, sodass in der verfügbaren Arbeitszeit weiterhin die Light Maintenance Wartungsereignisse im Rahmen der bestehenden Personalfixkosten gedeckt werden können.

Die Wartungskosten für das ElektRail Start-/Landesystem hängen nicht unmittelbar mit der Anzahl der Flugstunden zusammen, da das System während des Fluges selbst nicht benutzt und verschlissen wird. Denkbar wäre eine Abschätzung des Wartungsaufwandes in Abhängigkeit von der Anzahl von Starts und Landungen. Allerdings sind diese doch von vergleichsweise geringer Anzahl und nicht dominierend Verschleiß verursachend. Einen vermutlich größeren Einfluss dürften allgemeine witterungsbedingte Schäden haben, die durch Exposition gegenüber Nässe und ggf. Kleintieren auftreten. Daher wird nach Diskussion mit dem Hersteller ein rein zeitabhängiger Wartungsaufwand von 5% der Investitionsausgaben p.a. angewandt. Dies schließt sowohl das Launcher / Lander- wie auch das Automationssystem ein und beinhaltet Ersatzteile und Personalkosten.

TAB. 4.6: Annahmen zu Wartung und Verbrauchsmaterial

Annahme	Wert
Ersatzteile je Flugstunde (UAV + Bodensystem)	$\frac{\text{Investitionsausgaben}}{10.000}$
Personalkosten je Wartungsstunde	150 €
Wartungsintervall Light Maintenance	50 Flugstunden
Personalkosten für Light Maintenance	0 € (Fixkosten für Betriebspersonal)
Wartungsintervall Heavy Maintenance	150 Flugstunden
Wartungsaufwand Heavy Maintenance	8 Wartungsstunden
Verbrauchsmaterial (Energie und Schmierstoffe)	6 € je Flugstunde
ElektRail Launcher / Lander Maintenance	5% der Investitionsausgaben p.a.

4.2.3 VTOL UAV - hochautomatisierter Betrieb

Das dritte untersuchte Betriebskonzept beinhaltet senkrecht startende VTOL-Drohnen, welche tendenziell ein weniger effizientes Flugprofil auf der Strecke und dadurch eine geringere Reichweite als horizontal startende Starrflügel UAV aufweisen, und somit in der Regel eine höhere Anzahl an Betriebsbasen und Vehikeln benötigen, um ein bestimmtes Missionsgebiet abzudecken. Die hier angenommene VTOL Konfiguration ist eine Tilt-Rotor Auslegung mit starren Tragflächen, aber kippbaren Propulsoren, welche sowohl zum Schwebeflug wie auch zum flügelgetragenen Vorwärtsflug verwendet werden können.

Im Gegenzug ist ihr Betrieb und insbesondere der Turnaround durch Bodenstationen, wie beispielsweise in Abbildung 4.6 dargestellt, wesentlich leichter zu automatisieren und weist einen deutlich geringeren Flächenbedarf auf als selbst die verkürzte und hochautomatisierte Starrflügelvariante in Kapitel 4.2.2, da keine größere Horizontalbewegung des Luftfahrzeuges beim Start- oder Landevorgang erfolgt. Vergleichbar hingegen ist die Automatisierbarkeit des Betankungs- bzw.

Ladevorgangs des Luftfahrzeuges, da gleichfalls eine gute Positionierbarkeit des Luftfahrzeuges gewährleistet werden kann.



ABB. 4.6: Automatisierte Betriebsbasis für eine VTOL Drohne der Firma Beagle (*Hamburg Aviation Cluster, 2022*)



ABB. 4.7: VTOL Drohne des Anbieters Quantum Systems im Testbetrieb bei der Deutschen Bahn (*Köhn, 2020*)

4.2.3.1 Betriebskonzept und Personalkosten

Das Betriebskonzept der VTOL Variante ist im Wesentlichen mit dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen hochautomatisierten Starrflügeldrohnen-system identisch und beinhaltet ebenfalls je 5 Betriebsbasen eine*n zusätzlichen mobile*n Mitarbeiter*in zum Beheben von Störungen und Durchführung leichter Wartungsarbeiten. Annahmen zu den jährlichen Flugtagen, der Gehaltshöhe, sowie zum Personalbedarf im zentralen Kontrollzentrum sind unverändert, siehe Tabelle 4.4.

4.2.3.2 Kapitalkosten und Auslastung

Unterschiede ergeben sich vornehmlich hinsichtlich der Investitionsausgaben für die deutlich kleinere Bodenstation sowie die VTOL UAVs. Da die Bodenstation selbst keine dynamische Aktuatorik zur Synchronisation mit dem anfliegenden Luftfahrzeug benötigt, sondern primär als eine Art Garage mit einem einfachen Mechanismus zur Feinpositionierung des aufgesetzten UAV dient, werden die Investitionsausgaben nach Angabe von Branchenkreisen mit 25.000 € wesentlich niedriger als beim obigen Vergleichssystem angesetzt. Die Investitionsausgaben für die Automatisierung des Turnarounds werden unverändert mit 25.000 € veranschlagt, da hierfür eine vergleichbare Komplexität angenommen werden kann.

Die Investitionsausgaben für ein VTOL UAV variieren je nach Modell, Hersteller und Fähigkeiten stark. Insbesondere kleinere vollelektrische Systeme mit begrenzter Reichweite und Nutzlast werden mittlerweile in deutlich höherer Stückzahl produziert als konventionelle Starrflügelsysteme und unterliegen daher Skaleneffekten und einer Technologielernkurve, welche zu zunehmenden Kostensenkungen

führen. Um praktikable Reichweiten für den Anwendungsfall der Langstreckeninspektionen in dieser Arbeit zu erhalten, orientieren sich die Investitionsausgaben für ein UAV eher an hybrid-elektrischen Systemen mit größerer Reichweite wie beispielsweise die VTOL Varianten der Penguin B und C des Unternehmens *Edge Autonomy* (2022). Mit bis zu vierzehn Stunden Endurance bei 46 Knoten Cruise Geschwindigkeit⁷ ergibt sich eine rechnerische Reichweite von bis zu 1.200 km, wodurch klar wird, dass ein direkter Vergleich der möglichen Reichweitespektren mit konventionellen Starrflügel UAV durchaus Sinn ergibt, wenngleich die militärische Variante dieses Typs mit 32 kg MTOW in eine höhere Gewichtsklasse einzugruppieren ist.

TAB. 4.7: Annahmen zu Kapitalkosten

Annahme	Wert
Investitionsausgaben UAV	100.000 €
Investitionsausgaben Launch / Landing System	25.000 €
Investitionsausgaben Automatisierung des Turnarounds	25.000 €
Abschreibungsdauer UAV	3 Jahre
Abschreibungsdauer Launch / Landing System	7 Jahre
Abschreibungsdauer Automatisierung des Turnarounds	7 Jahre
Vehikel-Flugtage aus anderen Missionen p.a.	500
Cruise Geschwindigkeit	115 km/h

4.2.3.3 Wartung und Verbrauchsmaterial

Die luftseitige Teil des Wartungskonzeptes orientiert sich an den vorangegangenen Systemvarianten, da die Komplexität des UAV vergleichbar ist und sich nicht wesentlich von konventionellen Starrflügel UAV unterscheidet. Bei Ersatzteilen, Verbrauchsmaterial, Wartungsintervallen und Arbeitskosten für das UAV ergeben sich somit keine Unterschiede.

Die Wartung der Bodenstation jedoch fällt auf Grund der wesentlich geringeren Komplexität und Investitionsausgaben im Vergleich zum obigen ElektRail System wesentlich geringer aus und wird nach wie vor mit 5% der Investitionsausgaben veranschlagt.

⁷eine vergleichsweise langsame Befliegungsgeschwindigkeit begünstigt zusätzlich die Qualität der Bilderfassung, siehe Kapitel 5.1.1

TAB. 4.8: Annahmen zu Wartung und Verbrauchsmaterial

Annahme	Wert
Ersatzteile je Flugstunde	$\frac{\text{Investitionsausgaben}}{10.000}$
Kosten je Wartungsstunde	150 €
Wartungsintervall Light Maintenance	50 Flugstunden
Kosten für Light Maintenance	0 € (Fixkosten für Personal)
Wartungsintervall Heavy Maintenance	150 Flugstunden
Wartungsaufwand Heavy Maintenance	8 Wartungsstunden
Verbrauchsmaterial (Energie und Schmierstoffe)	6 € je Flugstunde
VTOL Bodenstation	5% der Investitionsausgaben p.a.

5. Vergleichende Systemanalyse für ausgewählte Infrastrukturen

Die vergleichende Systemanalyse verfolgt den Zweck, zunächst effiziente UAV Missionen zu generieren und kostenfokussiert zu optimieren. Die entwickelte Methode wird dabei herausarbeiten, welchen Einfluss die Reichweite sowie der gewählte UAV Typ auf die erzielbaren Befliegungskosten hat und wie sich dies auf die Wettbewerbsfähigkeit der UAV Befliegung gegenüber zugekauften Satellitendaten als Alternative auswirkt.

5.1 Bahnstrecken und Oberleitungen - Deutschland

Die System-of-Systems Untersuchung in dieser Arbeit behandelt zwei Fallstudien, von denen die erste das deutsche Schienennetz der *DB Netz AG* ist. Die *DB Netz AG* (2019) stellt auf ihrem *Open Data Portal* einen Datensatz mit Geopositionen des Streckensystems zur Verfügung. Von Interesse für die Inspektion sind mögliche Korrosion von elektrischen Leitern, sichtbare Schäden an Isolatoren und baulichen Einrichtungen sowie der optische Zustand des Gleisbettes selbst (z.B. Schotterabrieb des Gleisbettes, welcher auf Bodenbewegungen des Gleisfundamentes hinweist; lose Schienenhalterungen; gebrochene Eisenbahnschwellen). Für Details vergleiche Kapitel 3.3.

Im Folgenden werden für Inspektionen des deutschen Schienennetzes mit Hilfe des in Kapitel 4.1 entwickelten Algorithmus zunächst Missionen mit unterschiedlichen Konfigurationen luftgestützter Fernerkundungssysteme erstellt (Kapitel 5.1.2), anschließend das Kostenmodell aus Kapitel 4.2 auf die Ergebnisse der geographischen Optimierung angewandt (Kapitel 5.1.3) und schließlich eine vergleichende Systembewertung vorgenommen, welche sowohl die daraus resultierenden quantitativen Ergebnisse wie auch eine semiquantitative Diskussion der Eignung verschiedener Sensorträgerplattformen einschließt.

5.1.1 Payloadauslegung

Im Folgenden wird beispielhaft eine Nutzlastkonfiguration für eine beispielhafte Inspektionsmission untersucht. Abgeleitet aus den in Kapitel 3.3.2 dargelegten

Inspektionsanforderungen zur Begutachtung des Gleiskörpers inklusive nebenstehender Vegetation wird eine kamerabasierte Datenerhebung mit einer GSD von maximal 1 cm als erforderlich angesehen, um neben der geometrischen Lage des Gleiskörpers auch Korrosion an Schienen und Schienenklammern sowie ggf. gelockerte oder fehlende Verschraubungen erkennen zu können. Ferner wird für das Vegetationsmanagement gefordert, jeweils mindestens 25 m auf beiden Seiten einer Schienentrasse aufzunehmen. Des Weiteren sollen benachbarte 2 m breite Schienentrassen in einem maximalen Abstand von 25 m zueinander in einem Überflug erfasst werden, sodass sich eine Gesamtbreite der geforderten Bildstreifen von mindestens 79 m ergibt. Um die Bewegungsunschärfe gering zu halten, soll diese 1,0 cm Bodenprojektion nicht übersteigen. Es wird zudem eine Überlappung zweier aufeinanderfolgender Bilder von mindestens 75% gefordert.

Auf Grund der hier geforderten GSD von 1 cm kommen satellitengestützte Inspektionen für diese Mission nicht in Frage, da die erzielbare GSD hier erst bei ca. 10 cm beginnt (vgl. 2.3). Folglich wird ein UAV gestütztes Missionsdesign bevorzugt.

Zur Überprüfung herangezogen wird eine Phase One P5 Kamera *Pha* (2023) in Kombination mit einem 35mm Objektiv:

- Sensorbreite $S_w = 44mm$
- Sensorhöhe $S_h = 33mm$
- Belichtungszeit $f = 35mm$
- Pixelanzahl Breite $P_w = 13.468$
- Pixelanzahl Höhe $P_h = 9.564$
- Maximale Framerate pro Sekunde (fps) $fps = 4 \frac{1}{sec}$

Zudem werden folgende Parameter versucht:

- Flughöhe $H = 100m$
- Fluggeschwindigkeit des UAV (v) $v = 100km/h = 27,8m/s$
- Belichtungszeit (t) $t = 1/2500sec$

Berechnung der GSD in Sensorbreite:

$$GSD_w = \frac{H * S_w}{f * P_w} \quad (5.1)$$

$$= \frac{100 m * 44 mm}{35 mm * 13.468} \quad (5.2)$$

$$= 0.93 cm \quad (5.3)$$

Berechnung der GSD in Sensorhöhe:

$$GSD_h = \frac{H * S_h}{f * P_h} \quad (5.4)$$

$$= \frac{100 \text{ m} * 33 \text{ mm}}{35 \text{ mm} * 9.564} \quad (5.5)$$

$$= 0.99 \text{ cm} \quad (5.6)$$

Beide GSD Werte sind geringer als 1 cm und erfüllen damit die Anforderung. Die GSD für diese Konfiguration kann somit mit 0,99 cm angegeben werden.

Ferner ist eine Überprüfung der Bewegungsunschärfe notwendig:

$$\Delta x = 27,8 \text{ m/s} * \frac{1}{2500} \text{ s} \quad (5.7)$$

$$= 1,11 \text{ cm} \quad (5.8)$$

1,11 cm Bewegungsunschärfe übersteigt die geforderten 1,0 cm. Deshalb wird eine geringfügig kürzere Belichtungszeit gewählt, welche bei entsprechenden Lichtverhältnissen, Lichtstärke des Objektivs und Sensitivität des Sensors ausreichend sein sollte, jedoch im Praxistest überprüft werden muss.

$$\Delta x = 27,8 \text{ m/s} * \frac{1}{3000} \text{ s} \quad (5.9)$$

$$= 0,93 \text{ cm} \quad (5.10)$$

Eine Belichtungszeit von $\frac{1}{3000}$ s oder kürzer genügt bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h um die Bewegungsunschärfe unterhalb des geforderten Wertes zu halten. Sind die Lichtverhältnisse nicht ausreichend, müsste alternativ die Fluggeschwindigkeit reduziert werden.

Letztendlich bleibt die Überprüfung der geforderten Bildüberlappung und Bildbreite. Dabei wird der Kamerasensor in der Breite lateral zur Schienentrasse angeordnet:

$$\text{Bildbreite} = 13.468 \text{ px} * 0,93 \text{ cm/px} \quad (5.11)$$

$$= 125 \text{ m} \quad (5.12)$$

Eine Bildbreite von 125 m übersteigt die geforderten 79 m und ist damit ausreichend.

Der Bildüberlappung bei einer Frame Rate von 4 Bildern je Sekunde und einer Fluggeschwindigkeit von 27,8 m/s ergibt sich zu:

$$\text{Bildhöhe} = 9.564px * 0,99cm/px \quad (5.13)$$

$$= 94,7m \quad (5.14)$$

$$\text{Bildversatz} = \frac{27,8m/s}{4fps} \quad (5.15)$$

$$= 6,95m \quad (5.16)$$

$$\text{Bildüberlappung} = \frac{94,7m - 6,95m}{94,7m} \quad (5.17)$$

$$= 92,7 \quad (5.18)$$

Die Bildüberlappung bei maximaler Framerate beträgt 92,7 % und übersteigt damit die geforderten 75%.

Die Payloadkonfiguration mit der Phase One P5 erfüllt somit alle gestellten Anforderungen. Mit einem Payloadgewicht von 700 g erfüllt sie zudem die Tragfähigkeitsanforderungen der Drohnenklasse.

5.1.2 Routenoptimierung

Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, liefert der Routenführungsalgorithmus qualitativ gute und augenscheinlich plausible Ergebnisse, indem er sowohl Basen in Zielgebietsschwerpunkten platziert als auch alle Zielwegpunkte mit dem berechneten Missionsrouting abdeckt. Ausgehend von jeder mit einem roten Quadrat dargestellten Basis repräsentiert jede farbige Linie eine einzelne *Route* (Einzelflug). Alle Einzelrouten in ihrer Gesamtheit bilden eine *Mission*, die jeden Wegpunkt einmal überfliegt. Farbige Linien mit schwarzer Umrandung sind Routenbestandteile, welche auf einer Zielinfrastruktur entlangführen, während es sich bei fehlender schwarzer Umrandung um An- und Abflüge zu einer Zielinfrastruktur handelt. Abbildung 5.2 veranschaulicht, wie sich Unterschiede in der UAV-Reichweite auf die Routenführung auswirken. Unterschiede fallen besonders bei An- und Abflugsegmenten zwischen Basis und Zielinfrastruktur auf, die bei kürzeren verfügbaren Reichweiten deutlich zahlreicher ausfallen und Ineffizienzen Verursachen.

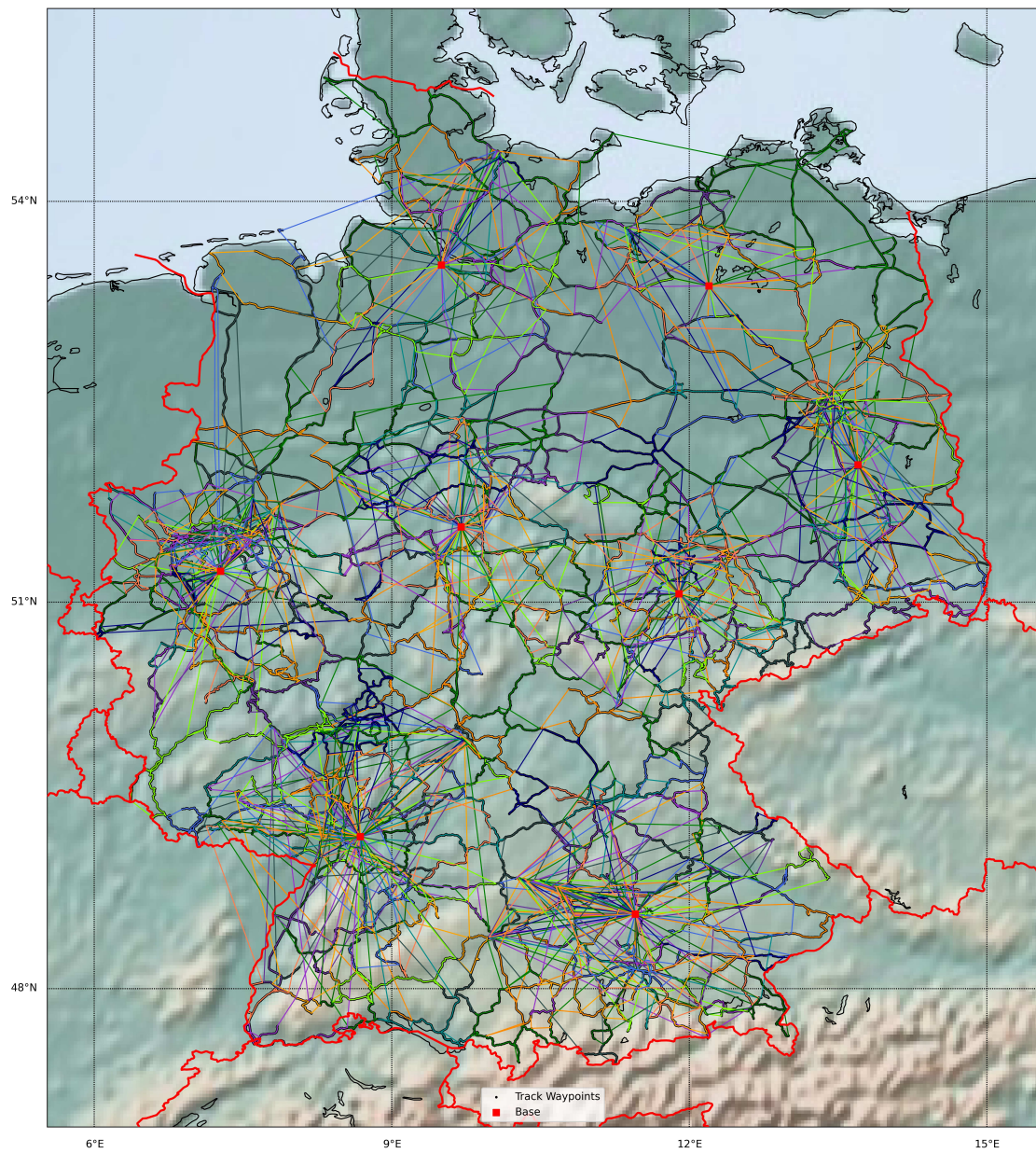


ABB. 5.1: Routing Lösung einer Mission für acht Betriebsbasen und 500 km Drohnenreichweite

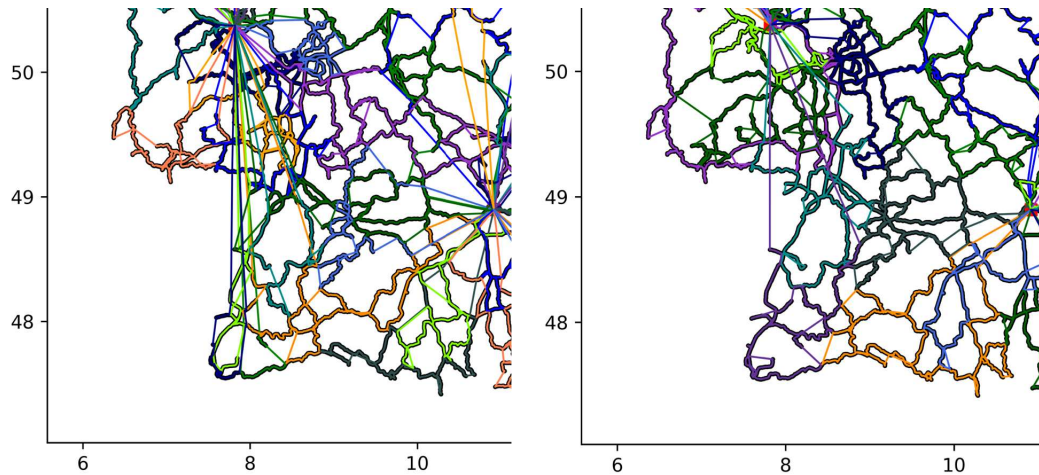


ABB. 5.2: Vergleich von Routingführungen in Süd-West-Deutschland mit einer Drohnenreichweite von 674 km (l) und 1100 km (r) bei vier Betriebsbasen

Wie erwartet erfordern kleinere verfügbare Drohnenreichweiten weit mehr individuelle Flüge, von denen jeder mit einer erheblicher An- und Abflugstrecke zu den eigentlichen Missionszielen einhergeht. Dies erklärt das nahezu vertikal-asymptotische Verhalten der Gesamtmissionslänge bei Annäherung an die Grenze für die am weitest entfernten Zielwegpunkte minimal erforderliche UAV-Reichweite bei einer bestimmten Konfiguration von Betriebsbasen (siehe Abbildung 5.3). Auffällig ist zudem, dass sich dichte Konfigurationen (d.h. viele Basen) bereits bei relativ kleinen UAV-Reichweiten einer infrastrukturspezifischen Mindestmissionslänge annähern. Spärliche Konfigurationen (d.h. wenige Basen) profitieren im Vergleich weitaus länger von der marginalen UAV-Reichweite, bis sie abnehmende Verbesserungen aus dem effizienten Hinzufügen zusätzlicher Routenziele zu einer geringeren Anzahl einzelner Flugrouten erfahren. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass in Abbildung 5.4 der durchschnittliche Anteil der tatsächlichen Reichweitennutzung bei spärlichen Konfigurationen für längere UAV-Reichweiten hoch bleibt. Im Gegensatz hierzu geht die Reichweitennutzung bei dichten Konfigurationen früher zurück, woraus sich schlussfolgern lässt, dass die marginale Reichweite bei spärlichen Konfigurationen in der Tat marginal vorteilhaft genutzt werden kann.

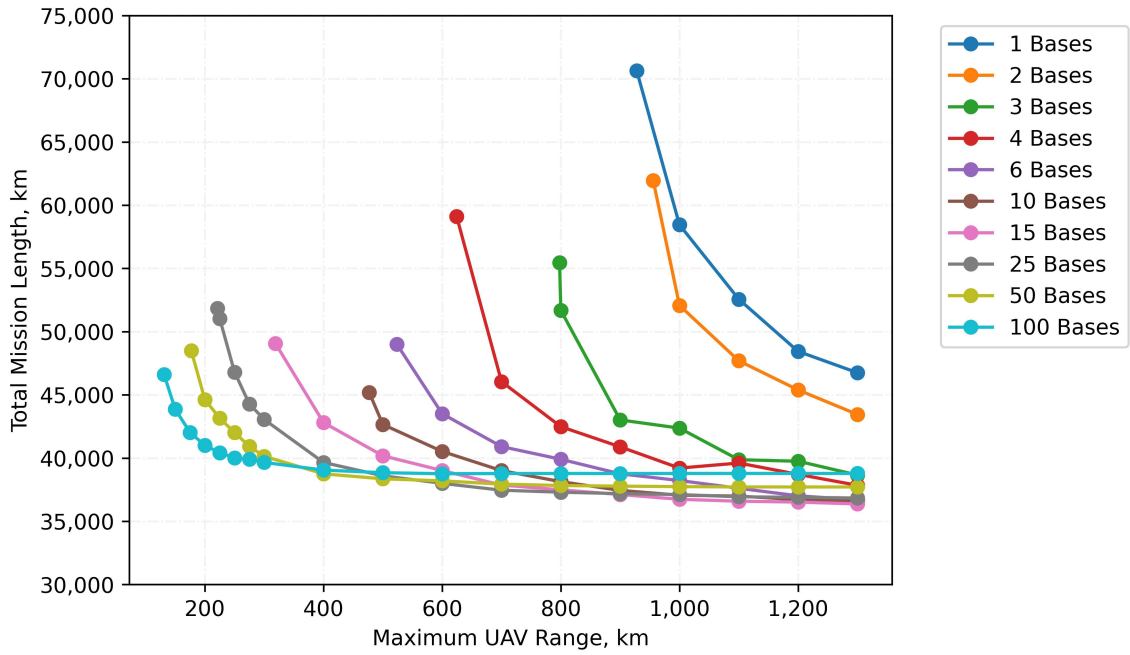


ABB. 5.3: Gesamtmissionslängen nach verfügbarer Reichweite und Basenkonfiguration

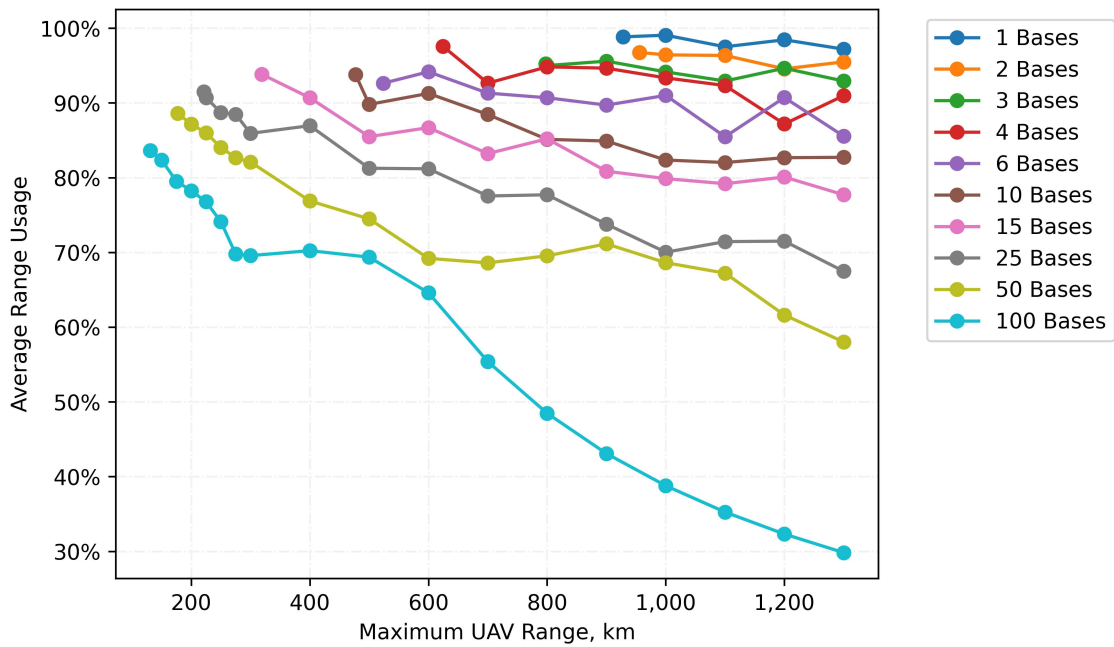


ABB. 5.4: Durchschnittliche Reichweitenausnutzung

Umgekehrt spiegelt sich dies im Anteil der Missionsflugstrecke wider, die über der Zielinfrastruktur selbst verbracht wird, im Gegensatz zur Strecke, die für den Anflug und die Rückkehr zur Einsatzbasis aufgewendet wird (siehe Abbildung 5.5). Der mit zunehmender verfügbarer UAV-Reichweite monoton zunehmende Charakter des Missionsanteils an der Zielinfrastruktur ist auch ein starker Indikator

für die Qualität der Lösungsergebnisse, die durch den angewandten Algorithmus bereitgestellt werden: Jede zwischenzeitliche Verringerung dieses Anteils in Verbindung mit einer erhöhten verfügbaren Reichweite würde darauf hindeuten, dass global suboptimale Lösungen bei bestimmten verfügbaren Reichweiten in lokalen Optima verweilen.

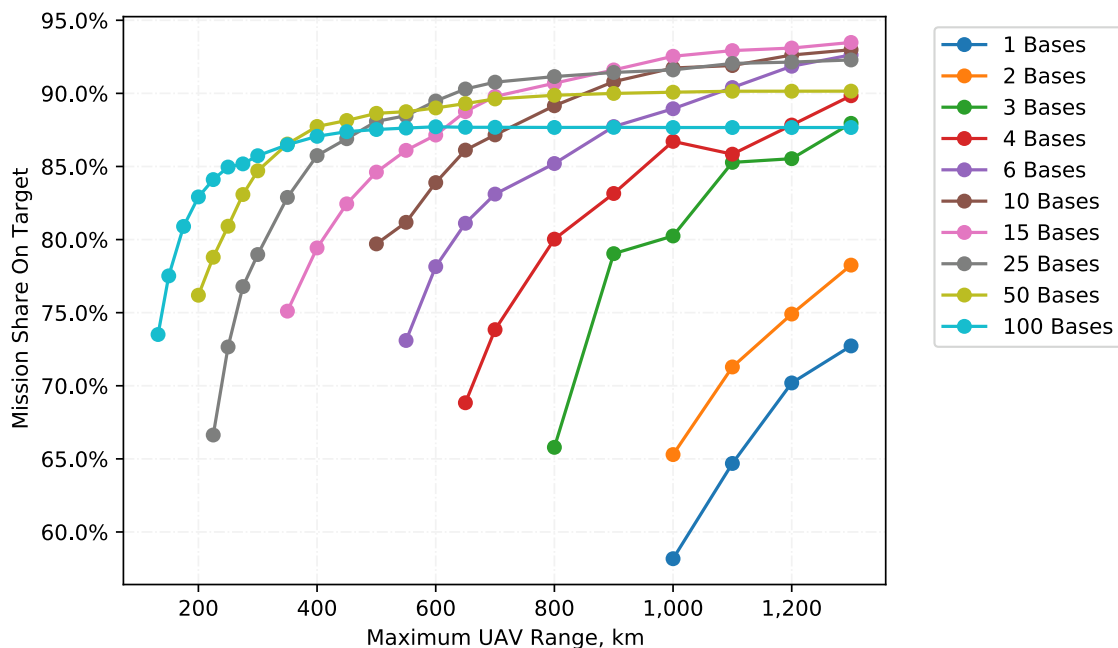


ABB. 5.5: Missionsanteil über der Zielinfrastruktur

Auffällig ist zudem, dass die Missionseffizienz (vgl. Abbildung 5.4) für extrem dichte Konfigurationen (50 und 100 Basen) bei einem niedrigeren Wert von knapp unter 60% maximal ist, während Konfigurationen mit mittlerer Dichte bis zu 63% erreichen. Dieser Effekt führt zu höheren Werten der Missionslänge für besonders lange UAV-Reichweiten im Vergleich zu Konfigurationen mit mittlerer Dichte. Ein wahrscheinlicher Grund für diesen Effekt ist, dass es ein infrastrukturenspezifisches Optimum an Stützpunkten gibt, oberhalb dessen nur zusätzliche, unnötige An- und Abflugstrecken zu den abzudeckenden Zielen anfallen. Ein weiterer Grund könnte in dem Algorithmus zum Platzieren der Basen liegen, der die Basis in den geographischen Schwerpunkt eines Zielclusters, aber nicht notwendigerweise direkt auf eine Zielinfrastruktur setzt. Dies wäre jedoch repräsentativ für Standorte in der realen Welt, da sich geeignete Grundstücke für Betriebsbasen möglicherweise auch nicht direkt neben der Zielinfrastruktur befinden. Bei ausreichend langen Reichweiten, die den Vorteil zusätzlicher Basen überflüssig machen, überwiegen also die Nachteile, was insgesamt ein doch unerwartetes, wenn auch kein unplausibles Ergebnis ist.

Unabhängig davon, wie die angenommenen Reichweiten in einem bestimmten Luftfahrzeugdesign realisiert werden würden, wird deutlich, dass kapitaleffiziente

Konfigurationen mit spärlicher Basenanzahl eine Mindestreichweite erfordern, da sich die in Abbildung 5.3 dargestellten Missionsreichweiten jeweils einer vertikalen Asymptote annähern. Betrachtet man die minimal erzielbare Gesamtmissionslänge bei Wahl der für jede Reichweite jeweils optimalen Basenkonfiguration (vgl. Abbildung 5.6), so stellt man fest, dass im Falle des deutschen Bahnnetzes bis 400 km Reichweite Effizienzgewinne durch eine bessere Routenführung verursacht werden, während für größere Reichweiten Optimierungen vornehmlich durch den Sprung auf eine spärlichere Basenkonfiguration ermöglicht werden. Letzterer Effekt ist im Falle des Bahnnetz allerdings nur mäßig ausgeprägt, sodass insgesamt doch ein annähernd asymptotisches Verhalten mit stark abnehmenden Effizienzgewinnen zu beobachten ist.

Abhängig von den damit verbundenen Flugkosten und der Kostenintensität je Betriebsbasis muss die kostenoptimale Lösung mit konkreten Kostenmodellen (vgl. Kapitel 5.1.3) für UAVs ermittelt werden.

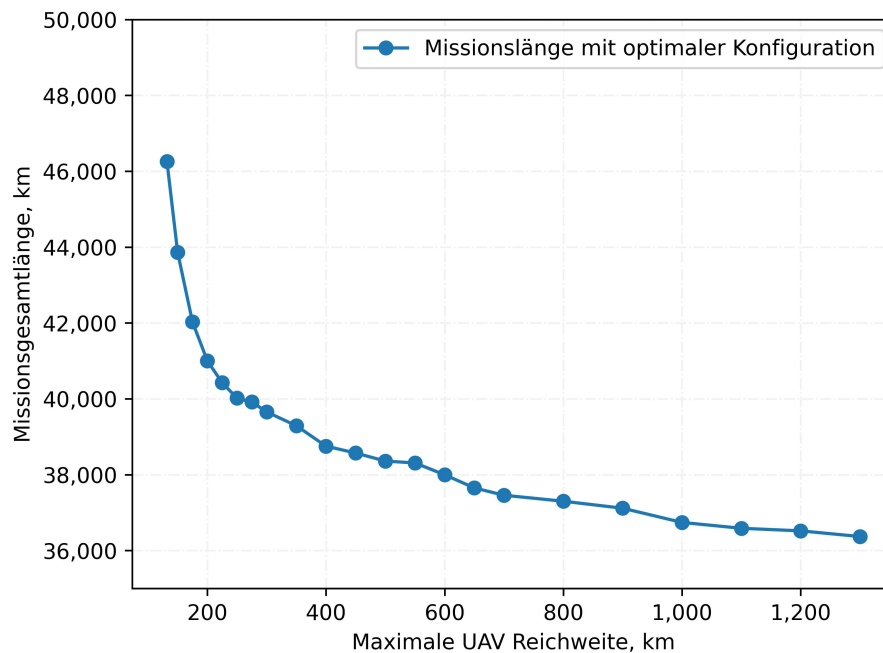


ABB. 5.6: Minimale Gesamtmissionslänge bei jeweils optimaler Basenkonfiguration

5.1.3 Kostenoptimierung

5.1.3.1 Starrflügel UAV - teilautomatisierter Betrieb

Wie in Abbildung 5.7 zu sehen ist, verändern sich die Gesamtsystemkosten innerhalb einer Startbasen-Konfiguration kaum mit zusätzlicher Reichweite und den dadurch optimierten Routenverläufen. Lediglich im Bereich der minimal erforderlichen Reichweite für eine jede Konfiguration sind geringfügige Kostensenkungen zu

beobachten, die aus der stärker veränderlichen Effizienz und den dadurch deutlich verringerten Flugstunden in diesem Bereich resultieren.

Erhebliche Kostensenkungen resultieren jedoch aus dem Wechsel zwischen Basenkonfigurationen: Höhere Reichweiten ermöglichen den Einsatz einer geringeren Anzahl an Startbasen, welche zu einer höheren Auslastung des Gesamtsystems und dadurch zu einer geringeren Fixkostenumlage auf die betrachtete Mission führt. Abbildung 5.8 stellt die Missionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration bei einer bestimmten Reichweite dar und zeigt insbesondere im Bereich geringerer Reichweiten um 200 km eine Minderung der Missionskosten um 80% bis 90% innerhalb von 100 km inkrementeller Reichweite. Insofern kann gefolgert werden, dass für den Anwendungsfall des deutschen Bahnnetzes minimal erforderliche Reichweiten von UAVs von 300 km oder mehr erforderlich sind, um eine grundsätzliche wirtschaftliche Tragfähigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Die Kostendegression mit zunehmender zur Verfügung stehender Reichweite verläuft zwar überwiegend, jedoch nicht ausschließlich stetig, wie in Abbildung 5.7 bei einer Konfiguration mit 15 Betriebsbasen bei 800 km Reichweite beobachtbar ist. Dies mag daran liegen, dass das Optimierungsziel des vorgelagerten Vehicle-Routing-Planners im ersten Schritt ist, eine missionslängenminimale Gesamtmission zu finden, jedoch als Ziel hat, eine kostenminimale Routenführung zu erstellen. Dies kann im Einzelfall dazu führen, dass eine veränderte Aufteilung von Missionszielen auf unterschiedliche Routen dazu führt, dass die resultierenden längeren Einzelrouten nicht mehr in der bisherigen Anzahl an Flugtagen abgeflogen werden können und ein zusätzlicher Flugtag benötigt wird, obwohl die Gesamtmissionslänge verkürzt werden konnte. Derartige Artefakte eines geringfügigen Anstiegs der Gesamtmissionslänge trotz höherer zur Verfügung stehender Reichweite haben jedoch augenscheinlich keinen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis der Kostenoptimierung.

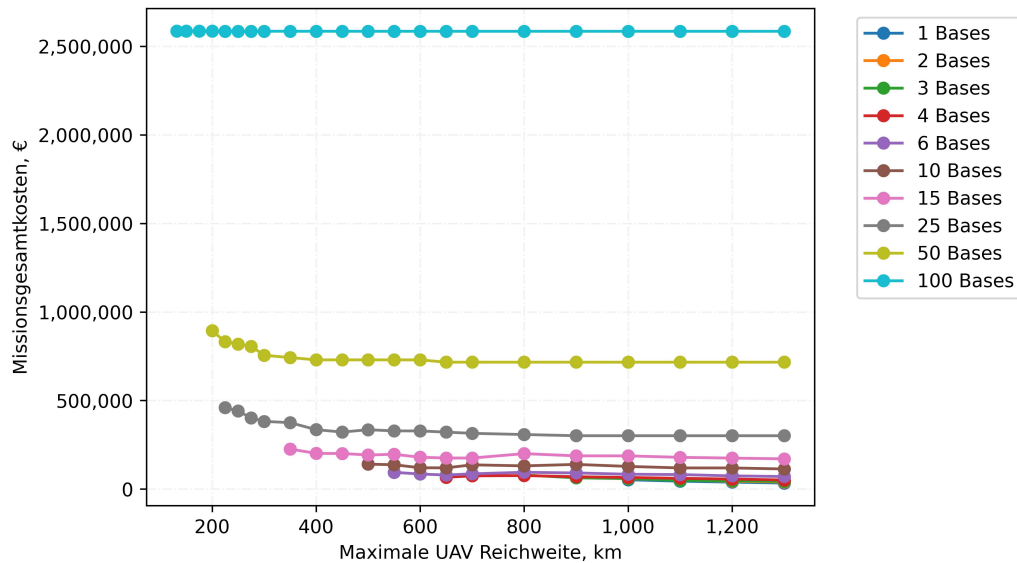


ABB. 5.7: Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen

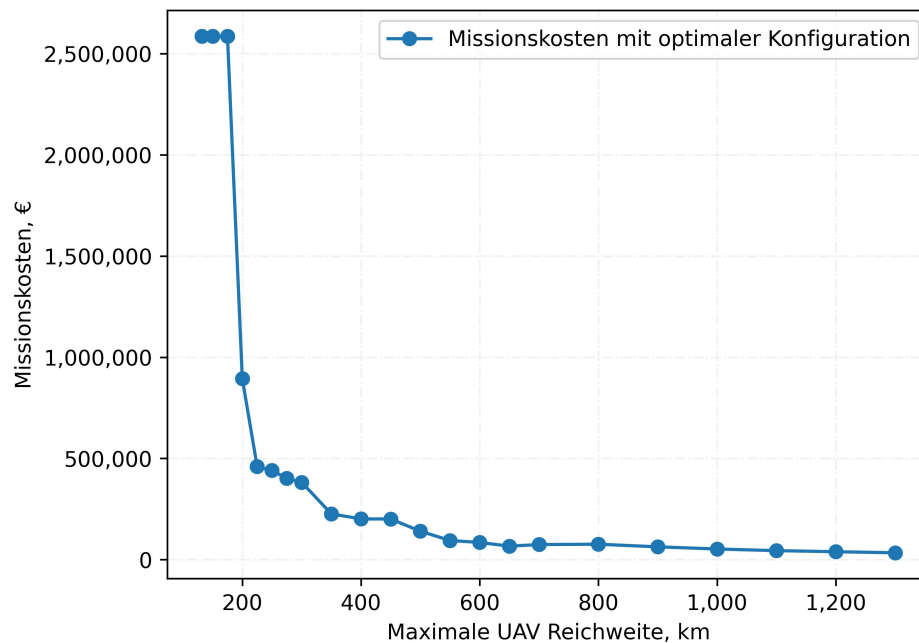


ABB. 5.8: Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

Die Kostenniveaus der einzelnen Basenkonfigurationen werden analog auch in den Kosten je Flugstunde in Abbildung 5.9 widerspiegelt. Während die relativen Kostenverhältnisse zwischen den Konfigurationen erhalten bleiben, ist zu beobachten, dass die Flugstundenkosten innerhalb einer Konfiguration im Bereich der minimal erforderlichen Reichweite teilweise sogar niedriger als bei höheren Reichweiten liegen erklärt sich dadurch, dass durch eine ineffizientere Routenführung

mehr Flugstrecke absolviert werden muss und sich die Fixkosten in der Folge stärker verteilen. Betrachtet man die Flugstundenkosten der kostenminimalen Konfiguration in Abbildung 5.10, so ist dieses Artefakt lediglich im Bereich der dichtesten Konfiguration zu beobachten, während der grundsätzliche Verlauf dem der Gesamtmissionskosten in Abbildung 5.8 folgt.

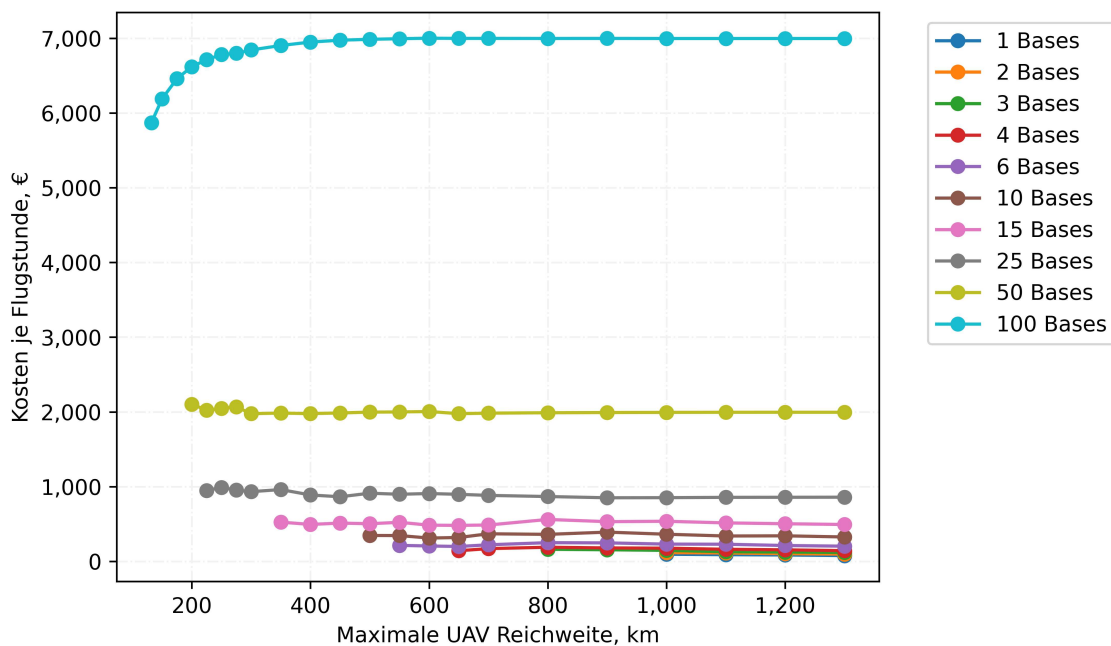


ABB. 5.9: Kosten je Flugstunde für unterschiedliche Basenkonfigurationen

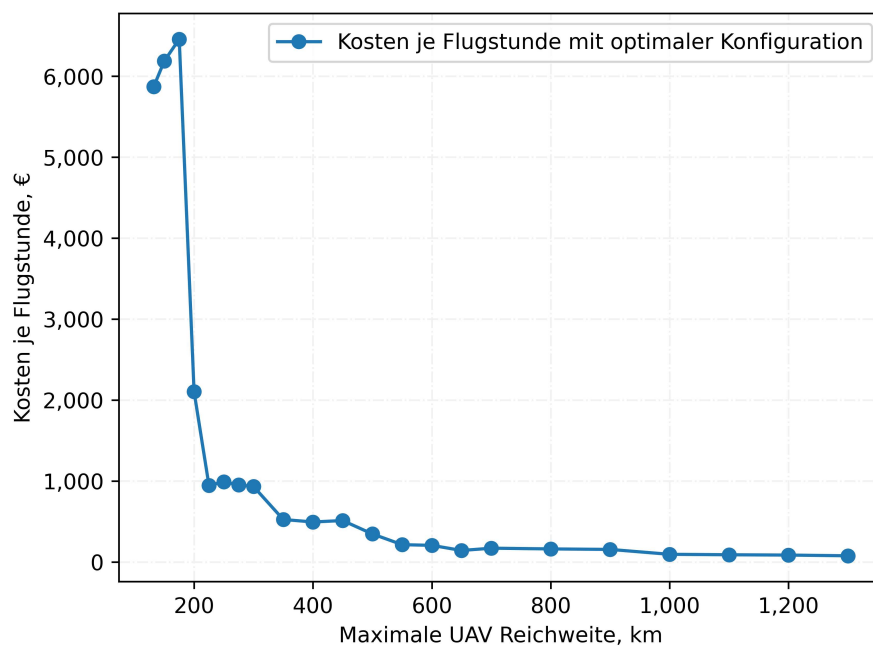


ABB. 5.10: Kosten je Flugstunde der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

Von Interesse für das Verständnis kostentreibender Faktoren ist insbesondere das Verhalten unterschiedlicher Kostenarten sowie deren Größenverhältnis zueinander von Bedeutung. Analysiert werden in diesem Kontext wiederum die Kosten der jeweils optimalen Konfiguration für jede verfügbare UAV Reichweite. Abbildung 5.11 zeigt, dass die extrem hohen Kosten unterhalb von 200 km Reichweite von den Fixkosten in den Bereichen Personal und in zweiter Linie durch Kapitalkosten in Form von Abschreibungen verursacht werden. Abbildung 5.12 veranschaulicht die Anteile der Kostenarten zueinander. Dabei wird deutlich, dass variable Kostenbestandteile in Form von Verbrauchsmaterial und der von den Flugstunden abhängigen Wartung erst bei Reichweiten jenseits von 600 km einen größeren und stetig steigenden Einfluss gewinnen, wenngleich Personal- und Kapitalkosten immer noch die dominierende Rolle spielen.

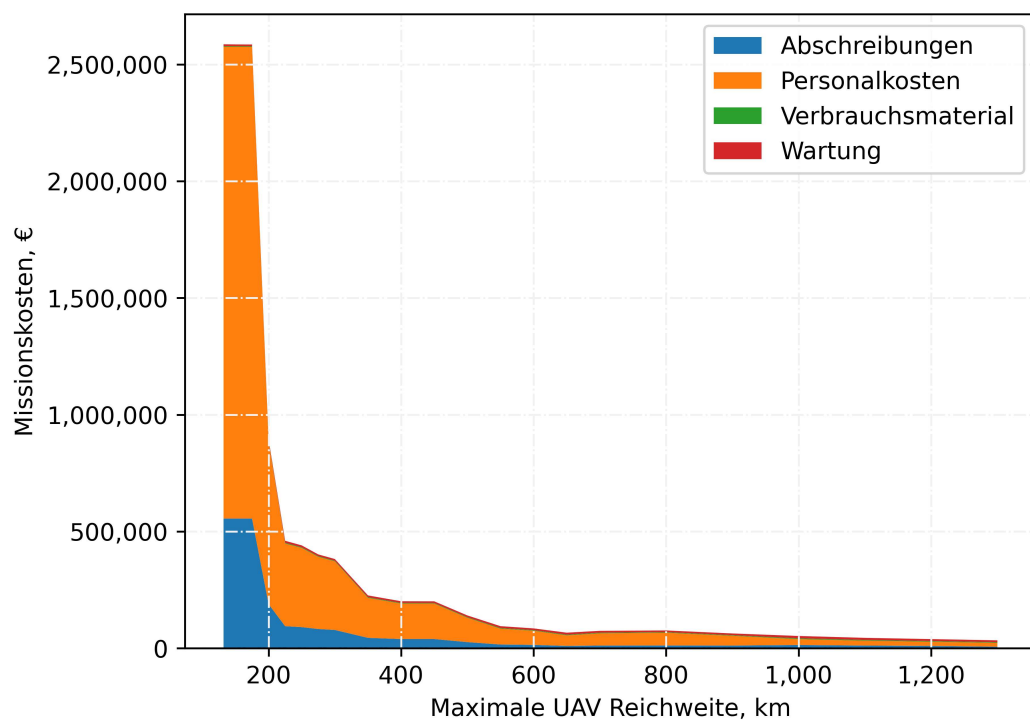


ABB. 5.11: Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration

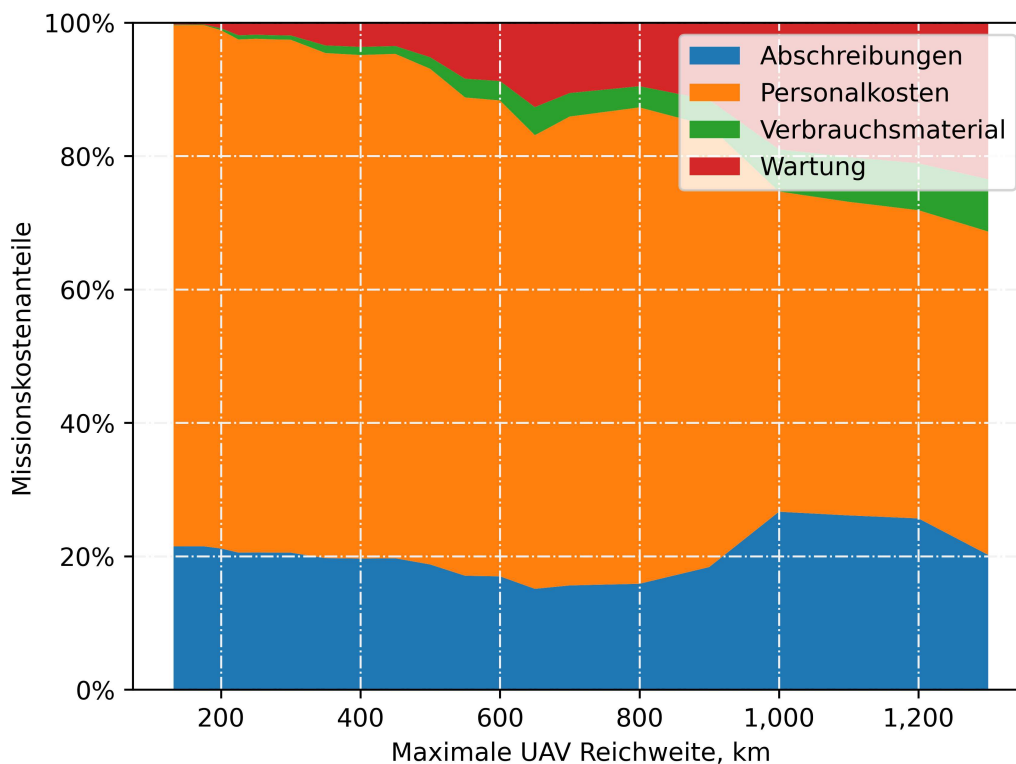


ABB. 5.12: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration

Nachdem deutlich wurde, dass die größten Kostentreiber Fixkosten sind, ist ein Blick auf eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Auslastung des Gesamtsystems lohnenswert, um den Einfluss der Fixkostenumlage auf mehr oder weniger Flugtage besser beurteilen zu können. Abbildungen 5.13 und 5.14 zeigen den Verlauf der Gesamtmissionskosten der jeweils kostenoptimalen Konfigurationen bei 0 bzw. 2500 missionsexternen Flugtagen gegenüber dem in Abbildung 5.8 verwendeten Standardszenario von 500 missionsexternen Flugtagen.¹

Sofort ersichtlich ist, dass sich die Kostenniveaus zwischen den drei betrachteten Auslastungsstufen erheblich voneinander unterscheiden. Während bei voller Fixkostenumlage (externe Flugtage = 0) die Gesamtmissionskosten von über 15 Mio. € bei 132 km Reichweite auf unter 300.000 € bei 1300 km Reichweite abfallen, liegt diese Spanne für 500 externe Flugtage zwischen 2,5 Mio. € und 34.000 € und für 2500 externe Flugtage gar nur zwischen 600.000 € und 21.000 €. Klar wird dabei, dass signifikante Unterschiede der relativen Kostenniveaus unabhängig von der verfügbaren Drohnenreichweite bestehen bleiben, jedoch die relative Kostenspanne zwischen den Szenarien im Bereich der höheren Reichweiten deutlich abnimmt. Ursächlich hierfür dürfte der Umstand sein, dass dort spärlichere Basenkonfigurationen zum Einsatz kommen, welche insgesamt weniger minimal erforderliche

¹Missionsexterne Flugtage sind solche, welche nicht der betrachteten Mission als Kostenstelle zugerechnet werden, sondern beispielsweise aus anderen Aufträgen resultieren.

Gesamtsystemkapazität und damit einhergehende Fixkostenbasis aufweisen. Insofern gehen diese Konfigurationen mit einer höheren Eigenauslastung einher und sind nicht in gleichem Maße auf zusätzliche Aufträge zur Senkung des Kostenniveaus angewiesen.

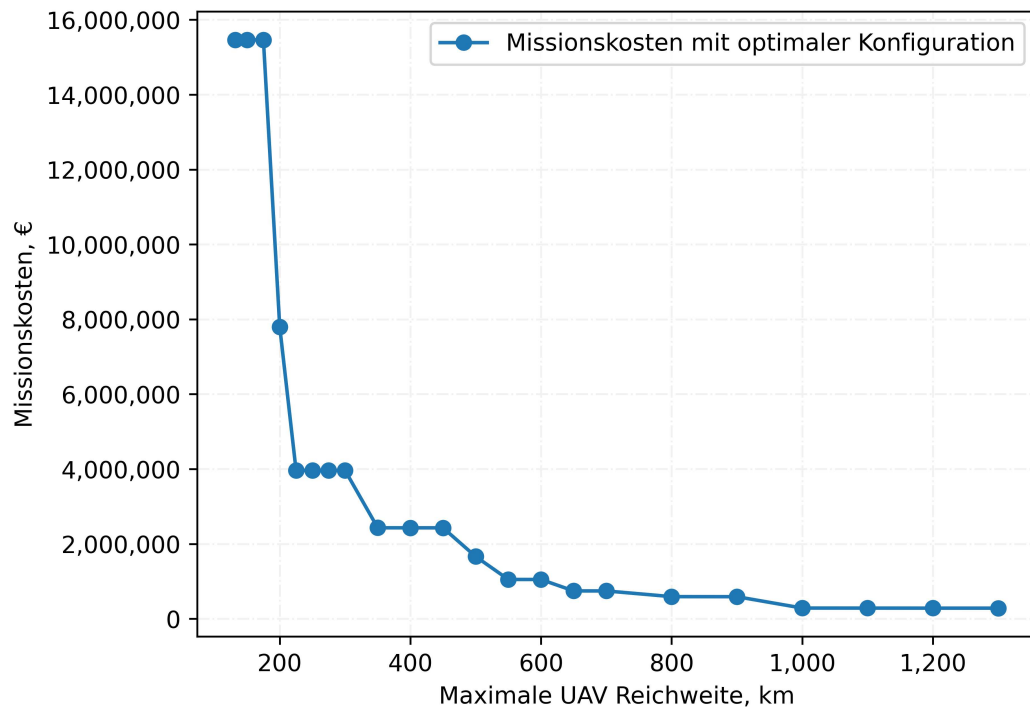


ABB. 5.13: Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

Die dominierende Rolle der Fixkosten und insbesondere der Personalkosten bei keinen zusätzlichen externen Flugtagen wird für 0 externe Flugtage in Abbildung 5.15 überdeutlich, in der selbst bei 1300 km Reichweite der Fixkostenanteil aus Personal- und Abschreibungskosten bei über 95% liegt.

Für 2500 externe Flugtage zeigt Abbildung 5.16, dass der Anteil der fixen Personalkosten in erheblichem Maße abnimmt und maßgeblich für die Senkung der Missionskosten verantwortlich ist. Interessant ist das Verhalten der Abschreibungskosten, welche zwar in absoluten Zahlen sowohl mit zunehmender verfügbarer Reichweite wie auch mit der Anzahl externer Flugtage abnimmt, jedoch in relativen Kostenanteilen über zwischenzeitlich wieder zunimmt. Dies ist bei höherer Gesamtsystemauslastung insbesondere bei spärlichen Basiskonfigurationen der Fall, da es sich hierbei in der Modellierung streng genommen, um sprungfixe Kosten handelt: Das Modell berücksichtigt die maximale Kapazität an Flugtagen per annum je UAV und fügt bei Bedarf weitere Luftfahrzeuge zum Gesamtsystem hinzu. Dementsprechend ist die Kostendegression bezogen auf die betrachtete Mission zwar in absoluten Zahlen vorhanden, jedoch schwächer ausgeprägt als bei den echt-fixen Personalkosten, weshalb sie diese anteilig mitverdrängen.

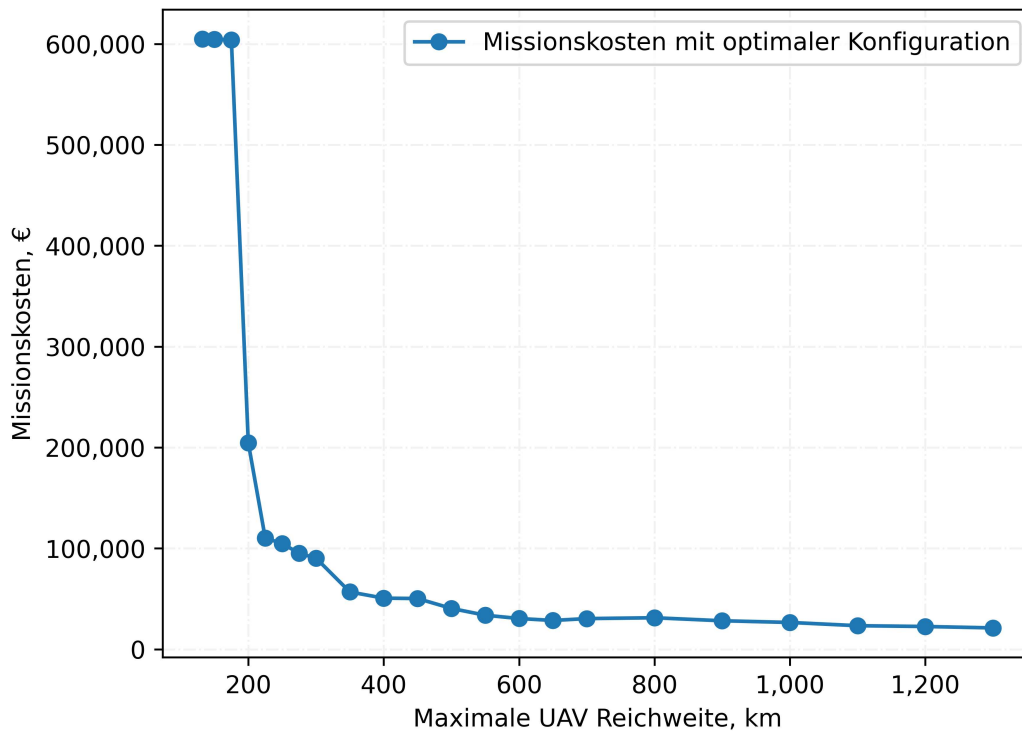


ABB. 5.14: Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

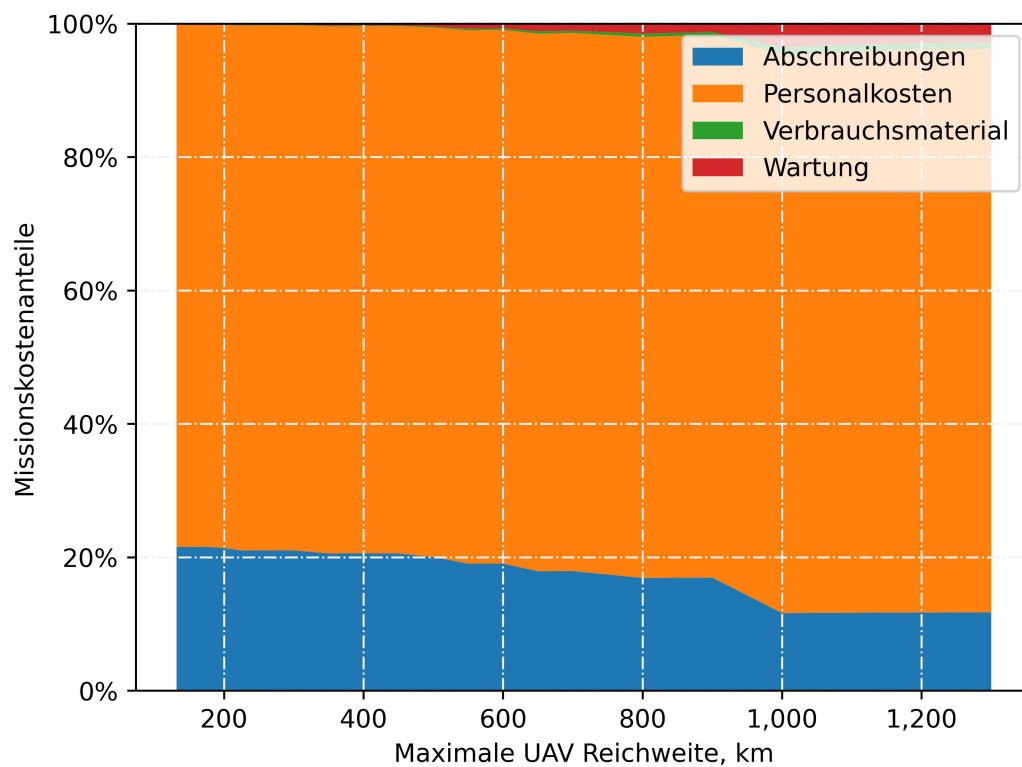


ABB. 5.15: Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen

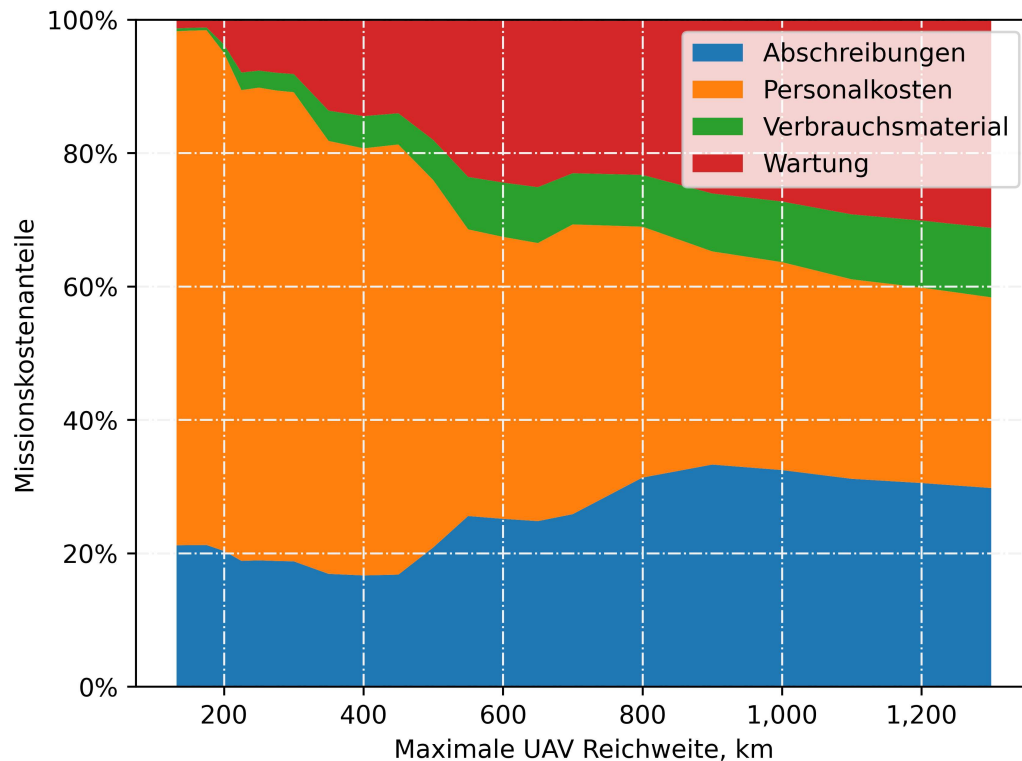


ABB. 5.16: Kostenartenanteile der jeweils besten Basiskonfiguration bei 2500 externen Flugtagen

5.1.3.2 Starrflügel UAV - hochautomatisierter Betrieb

Das hochautomatisierte Starrflügel UAV Systemkonzept mit dem Start-Lande-Automaten, welches in Kapitel 4.2.2 genauer beschrieben wurde, weist gegenüber dem teilautomatisierten Gesamtsystem deutlich andere Charakteristika auf. Vergleicht man die in Abbildungen 5.17 und 5.18 gezeigten Gesamtkostenniveaus mit den Kosten des teilautomatisierten Systems, so wird deutlich, dass dieses bei der kürzesten untersuchten Reichweite von 132 km mit 1,3 Mio. € gegenüber vorherigen 2,5 Mio. € bei den gewählten Annahmen um etwa die Hälfte niedriger liegt. Dieser Unterschied vermindert sich jedoch bei größeren Reichweiten deutlich: Bei 1300 km Reichweite liegen die Missionskosten mit 31.000 € nur noch geringfügig unter denen des teilautomatisierten Systems, welches für diese Reichweite ca. 34.000 € an Kosten verursacht.

Die in Abbildungen 5.19 und 5.20 dargestellten Flugstundenkosten spiegeln im Kern den Verlauf aus dem teilautomatisierten Gesamtsystem wider, wenngleich auf niedrigerem Kostenniveau. Auch hier gleichen sich die Kosten der hoch- und teilautomatisierten Systemvarianten bei höheren Reichweiten zunehmend an.

Abbildungen 5.21 und 5.22 hingegen zeigen ein deutlich verändertes Verhalten der einzelnen Kostenarten des hochautomatisierten Systems im Vergleich zum teilautomatisierten. Insbesondere die vormals alles dominierenden Personalkosten sind

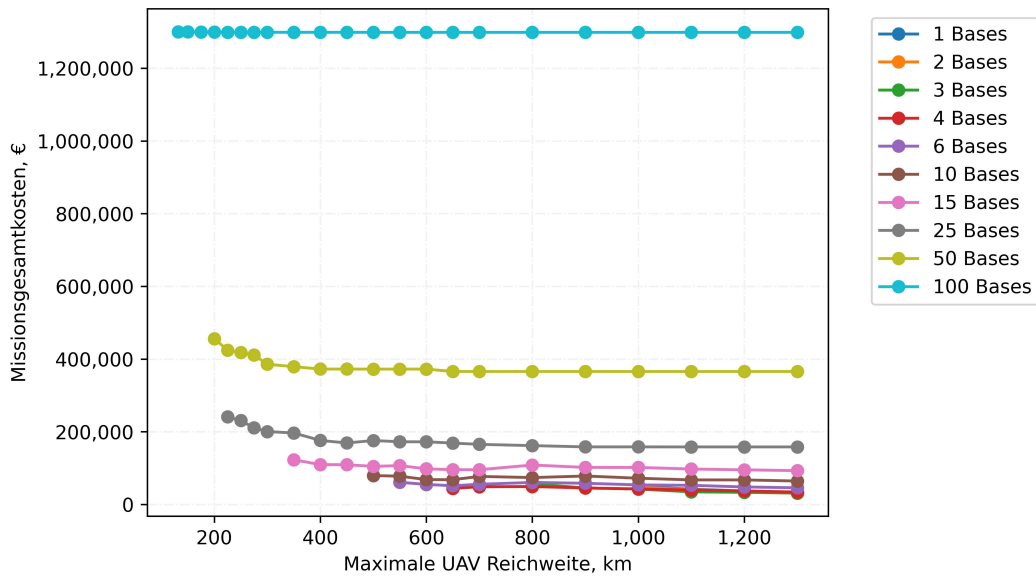


ABB. 5.17: Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen

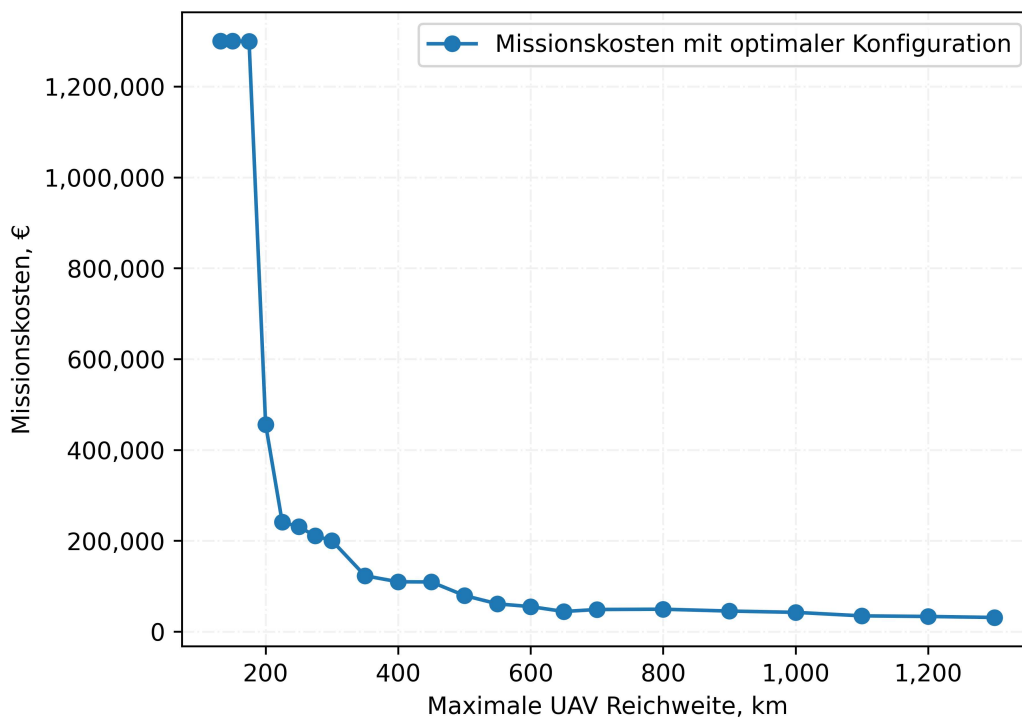


ABB. 5.18: Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

nun nicht mehr von derart überragender Bedeutung insbesondere im Bereich geringerer Reichweiten. Gleichzeitig jedoch sind in diesem Bereich beinahe doppelt so hohe Kapitalkosten (Abschreibungen) wie auch Wartungskosten zu verzeichnen. Dies wird gerade bei geringen Reichweiten von der großen Anzahl an Betriebsbasen getrieben, welche nun jede für sich nicht nur aus dem UAV selbst, sondern

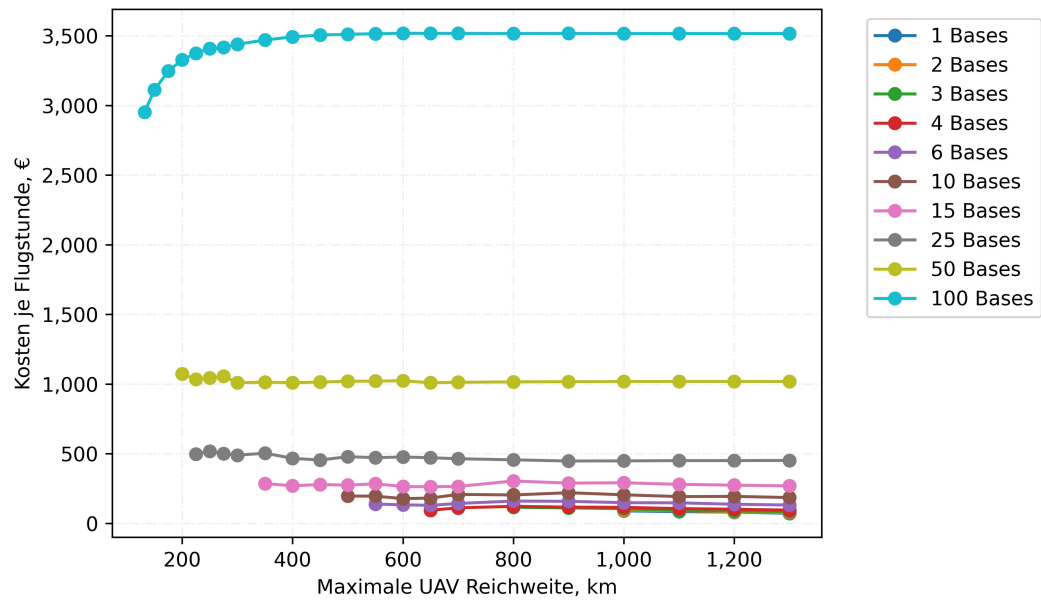


ABB. 5.19: Kosten je Flugstunde für unterschiedliche Basenkonfigurationen

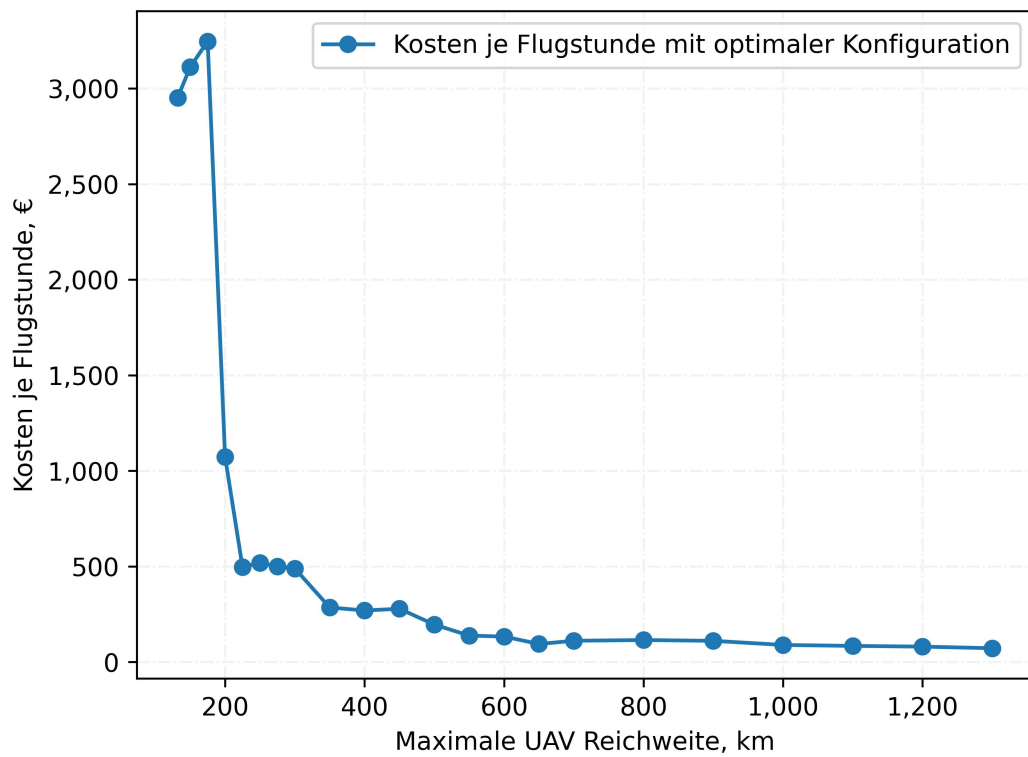


ABB. 5.20: Kosten je Flugstunde der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

auch aus dem Start- Landesystem besteht. Ist eine Konfiguration tragend, welche eine niedrige Auslastung der Hardware aufweist, wirkt dies kostentreibend.

Bemerkenswert bei höheren verfügbaren Reichweiten ist jedoch der steigende relative Anteil an Personalkosten, welche die Abschreibungen zunehmend verdrängen. Dies ist der Fall, da das Kostenmodell die Annahme berücksichtigt, dass je fünf Betriebsbasen eine (weitere) Person als Betriebspersonal notwendig ist und zudem zwei Personen dauerhaft die Betriebszentrale besetzen müssen. Insofern sinken bei höheren Reichweiten und damit einhergehenden spärlicheren Basenkonfigurationen die Personalkosten nicht im selben Umfang wie die Abschreibungen, wenngleich auch hier in absoluten Zahlen eine Kostendegression zu beobachten ist.

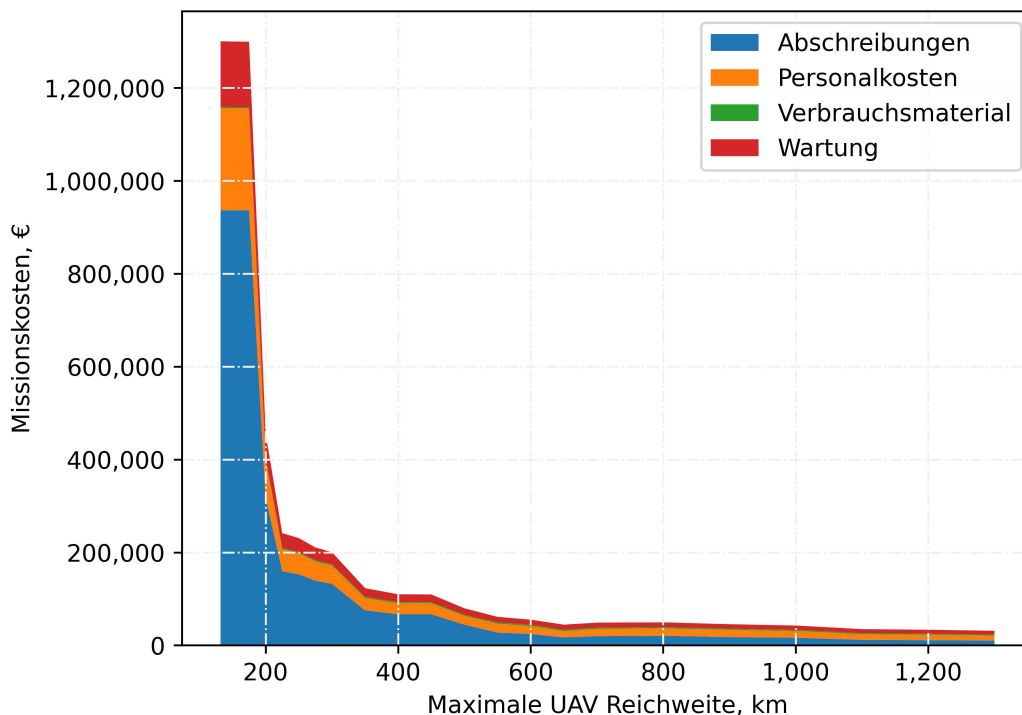


ABB. 5.21: Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration

Abbildungen 5.23 und 5.24 zeigen wiederum den Einfluss der Auslastung auf die Gesamtmissionskosten bei jeweils 0 und 2500 externen Flugtagen. Grundsätzlich ist hier ein sehr ähnliches Verhalten wie beim teilautomatisierten System zu beobachten, lediglich auf etwa der Hälfte dessen Kostenniveaus im Bereich geringer Reichweiten und lediglich geringfügig reduzierten Missionskosten im Bereich sehr großer Reichweiten: So sinken für 0 externe Flugtage die Kosten durch die Hochautomatisierung von ca. 280.000 € auf 250.000 €, während sich bei 2500 externen Flugtagen eine Reduktion von 21.000 € auf 18.000 € ergibt.

Die in Abbildungen 5.25 und 5.26 gezeigten Verläufe der relativen Kosten zeigen gegenüber dem nur teilautomatisierten System und geringer Auslastung (0 externe Flugtage) einen deutlich höheren Anteil an Wartung. Dies liegt daran, dass die Wartungsintensität des Start-/Landesystems nicht an Hand von Zyklen oder Flugstunden abnutzungsorientiert und variabel modelliert wird, sondern auf Grund der Systemeigenschaften zeitbezogen berechnet wird. Folglich verhält sich

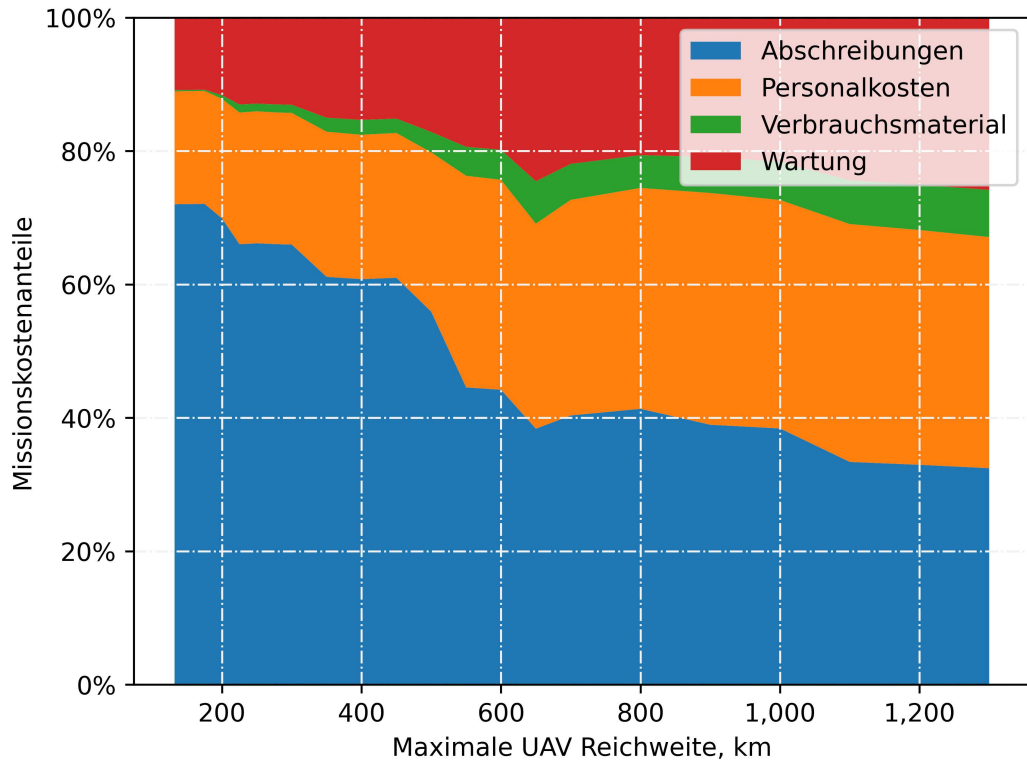


ABB. 5.22: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration

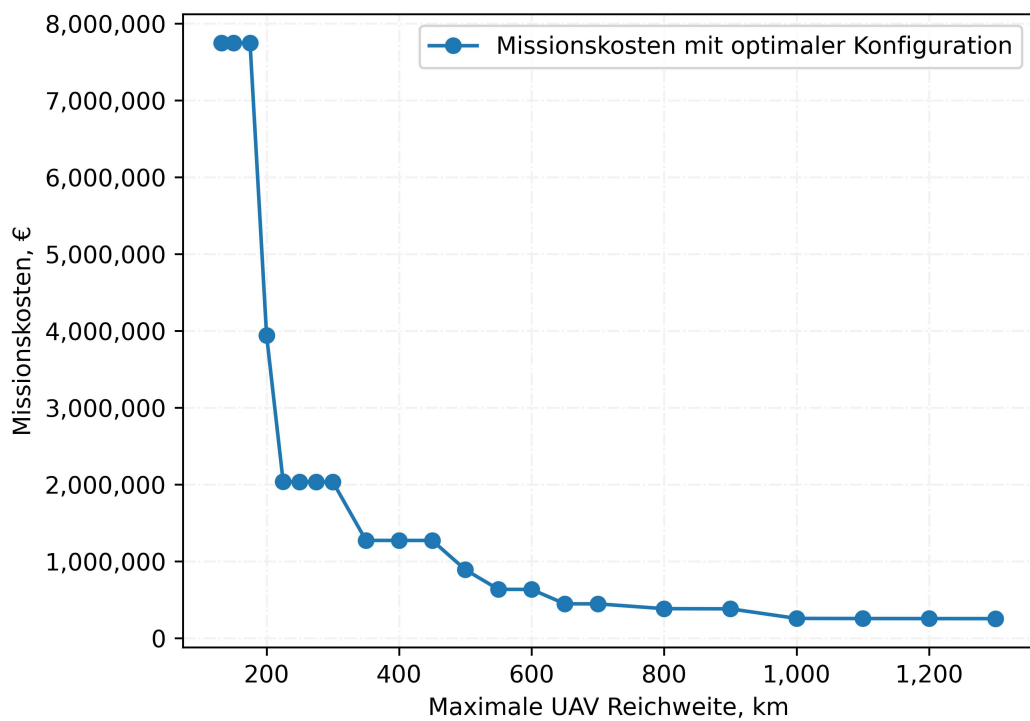


ABB. 5.23: Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

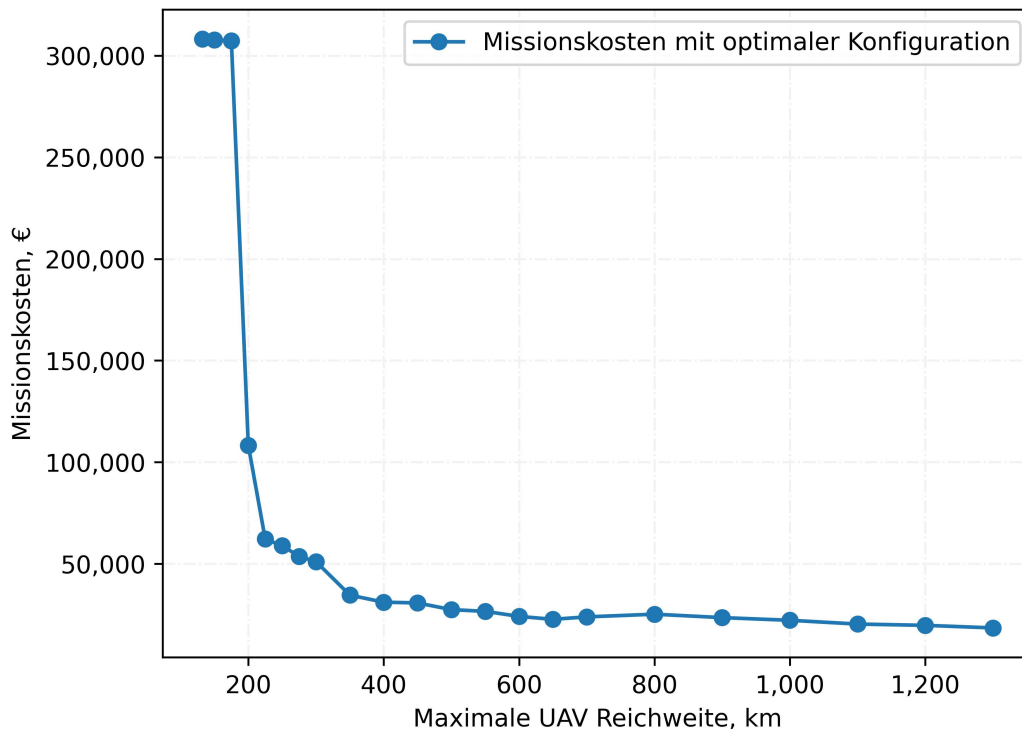


ABB. 5.24: Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

der bodengestützte Anteil der Wartungskosten wie Fixkosten und schlägt besonders bei geringer Auslastung zu Buche. Die Zunahme der Wartungskosten gegenüber dem teilautomatisierten Fall ist bei 2500 externen Flugtagen zwar immer noch vorhanden, allerdings auf Grund der besseren Fixkostenumlage nicht mehr so ausgeprägt.

Besonders auffällig ist jedoch die hohe Sensitivität der Personalkosten sowie der Abschreibungen. Bei einer niedrigen Gesamtsystemauslastung (Abbildung 5.25) sind zunächst Abschreibungen mit ca. 70% Anteil die dominierende Größe, werden mit größerer Reichweite allerdings von Personalkosten abgelöst, welche als lediglich sprungfixe Kosten bei einer besseren Einzelbasisauslastung resultierend aus einer geringeren Basenanzahl entlang der Reichweite weniger stark zurückgehen und somit einen größeren Anteil einnehmen. Deutlich anders sieht dies bei einer höheren Systemauslastung in Abbildung 5.26 aus: Während die Ausgangslage bei geringer Reichweite hinsichtlich der Kostenanteile ähnlich der im vorherigen Fall ist, können die Personalkosten bei größerer Reichweite und dadurch weniger Betriebsbasen auf deutlich mehr mehr Flugtage umgelegt werden und nehmen somit einen geringeren Anteil an den Missionskosten ein. Der verbleibende variable Aufwand an Wartung und Verbrauchsmaterial nimmt hingegen einen größeren Anteil an den Missionskosten ein. Erstaunlicherweise liegt der allerdings auch der Anteil der Abschreibungskosten an den Gesamtmissionskosten höher als bei der geringeren Gesamtsystemauslastung, was dadurch erklärt werden kann, dass bei nur

wenigen Betriebsbasen zusätzliche UAVs zur Flotte hinzugefügt werden müssen, um die notwendige Befliegungskapazität bereitzustellen, was jedoch die Personalkosten nicht weiter erhöht.

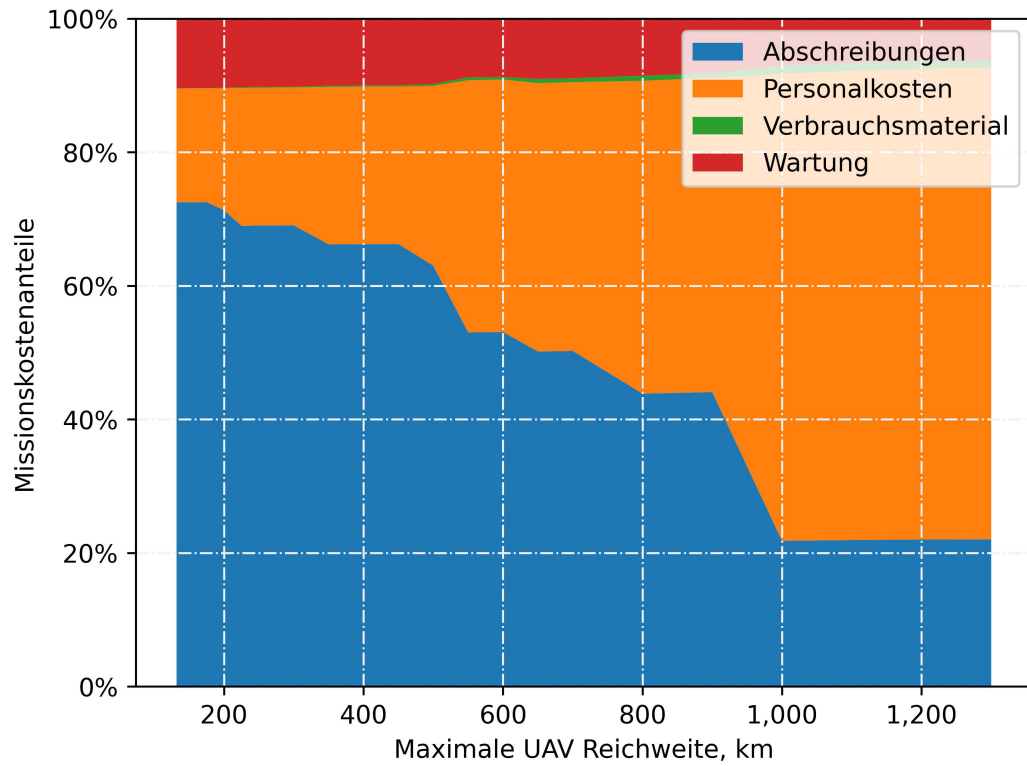


ABB. 5.25: Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen

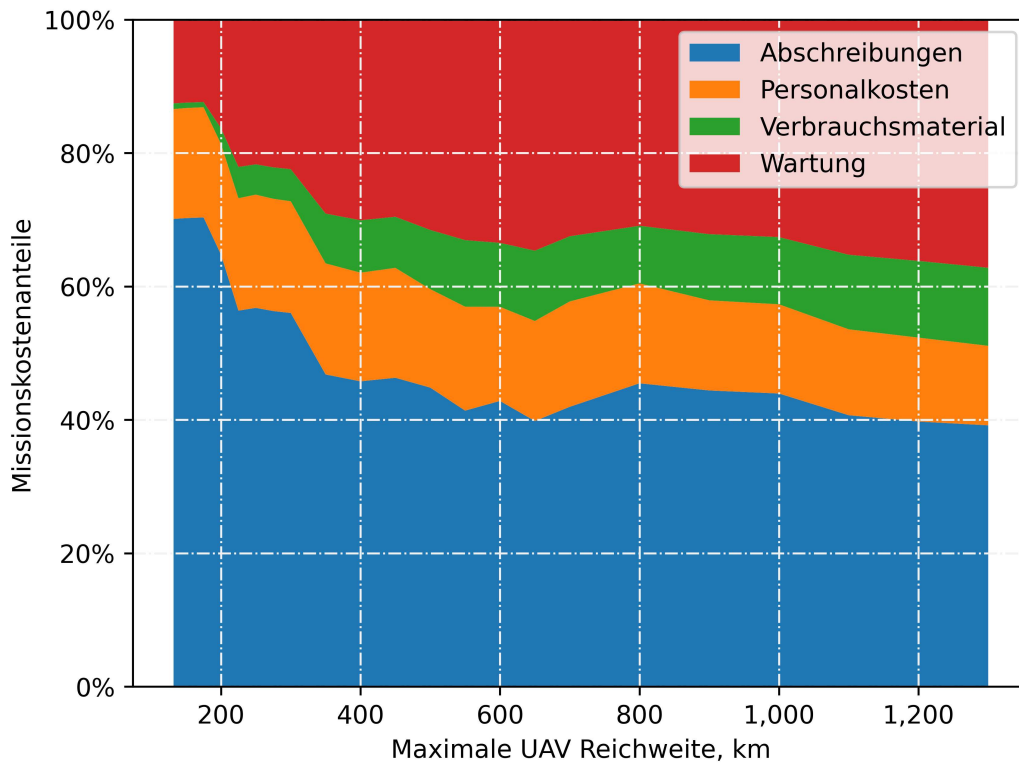


ABB. 5.26: Kostenartenanteile der jeweils besten Basiskonfiguration bei 2500 externen Flugtagen

5.1.3.3 VTOL UAV - hochautomatisierter Betrieb

Gegenüber den beiden vorangegangenen Systemkonzepten weist das hochautomatisierte VTOL Gesamtsystem nochmals erheblich reduzierte Missionskosten auf (Abbildungen 5.27 und 5.28). Beginnend mit lediglich 950.000 € (gegenüber 1,3 Mio € für hochautomatisierte Starrflügel UAV) bei 132 km Reichweite sinken die Missionskosten der besten Konfiguration bis auf 27.000 € (gegenüber 31.000 € für hochautomatisierte Starrflügel UAV) für die längste untersuchte Reichweite von 1.300 km.

Dieser Trend wird ebenso bei den Flugstundenkosten in Abbildungen 5.29 und 5.30 abgebildet, welche gegenüber den vorherigen Systemvarianten einen ähnlichen Verlauf aufweisen, allerdings auf dem nochmals niedrigeren Kostenniveau.

Beim Blick auf die Kostenzusammensetzung in absoluten Zahlen (Abbildung 5.31) bzw. relativen Anteilen (Abbildung 5.32), wird eine große qualitative Ähnlichkeiten zum hochautomatisierten Starrflügelsystem augenscheinlich. Hinsichtlich Personal, Verbrauchsmaterial und der luftfahrzeugseitigen Wartung weisen die beiden Gesamtsysteme große Ähnlichkeiten bei jeweils gleicher Reichweite auf. Die Unterschiede in den Gesamtmissionskosten rühren von merklich geringeren Abschreibungen her, welche durch eine weniger aufwändige Bodenstation verursacht

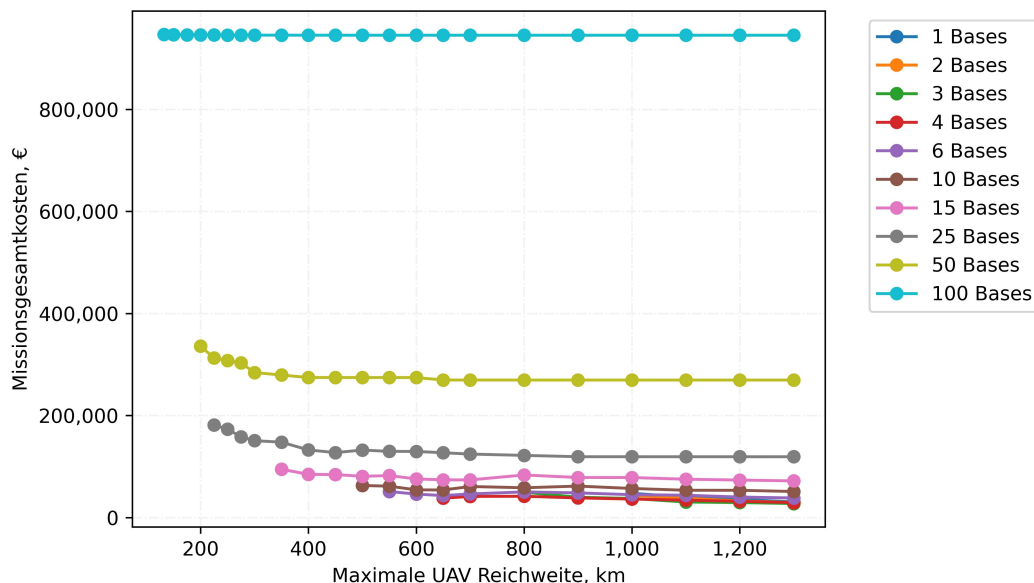


ABB. 5.27: Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen

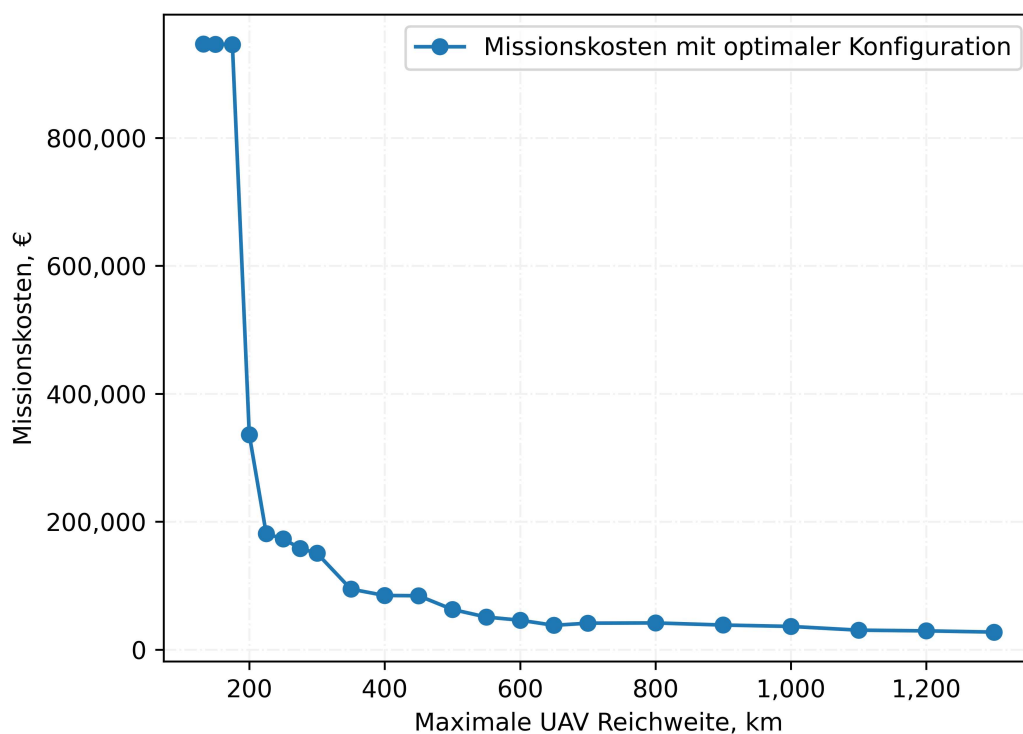


ABB. 5.28: Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

wird. Dies schlägt sich ebenfalls auf den bodenseitigen Wartungsaufwand für die Betriebsbasen nieder, welcher anteilig von den zugehörigen Investitionsausgaben veranschlagt wird.

Die Kostenverläufe bei unterschiedlichen Auslastungen (Abbildungen 5.33 und

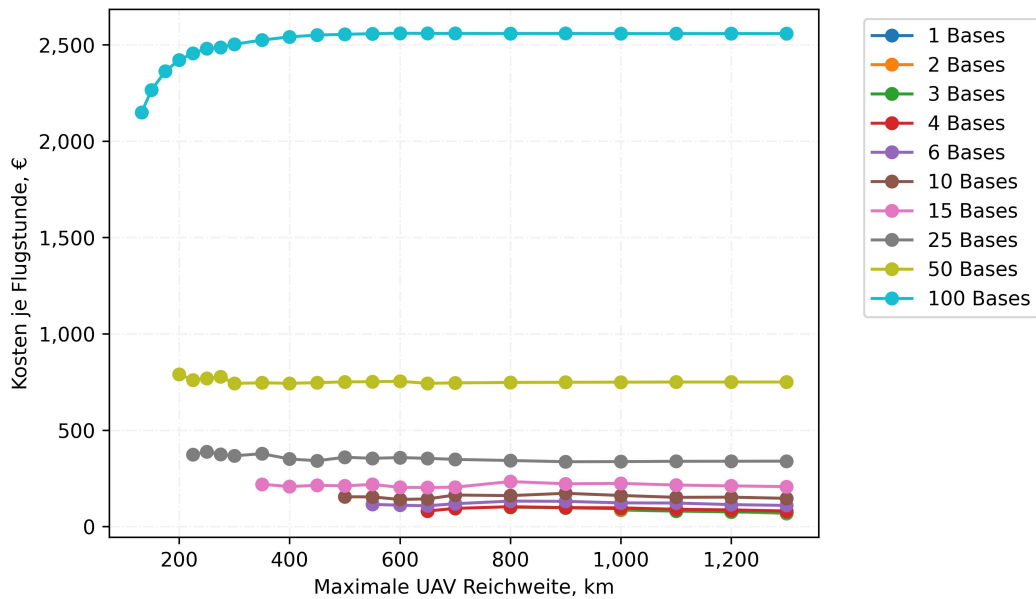


ABB. 5.29: Kosten je Flugstunde für unterschiedliche Basenkonfigurationen

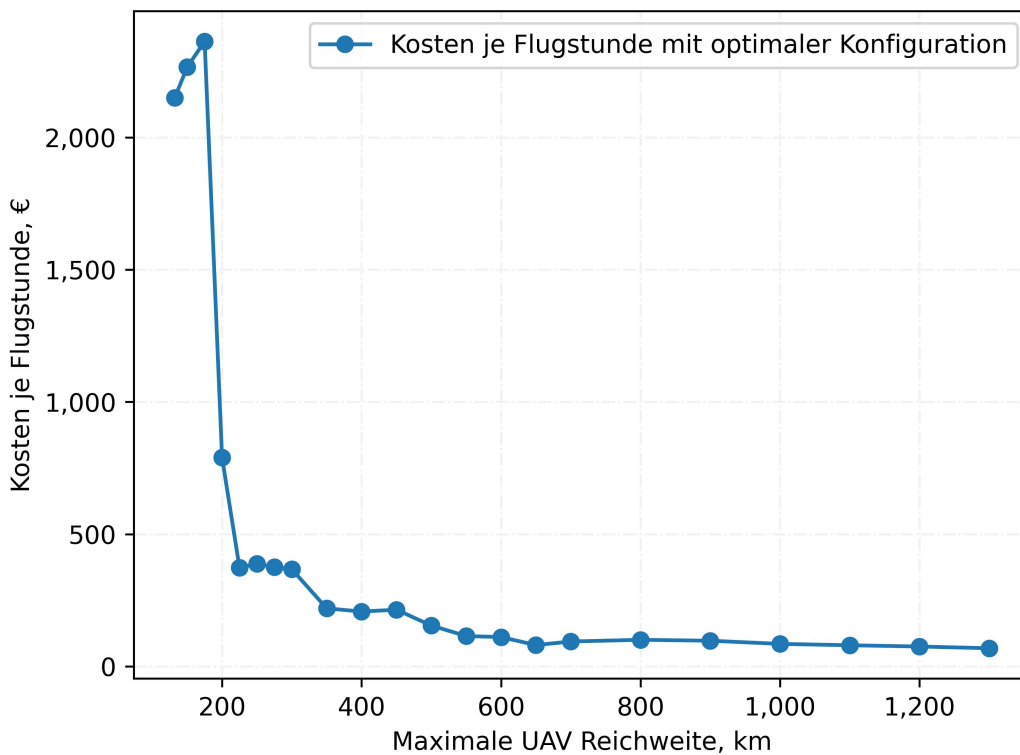


ABB. 5.30: Kosten je Flugstunde der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

5.34) zeigen, wie auch die Starrflügelsysteme vorher, erhebliche Sensitivitäten hinsichtlich der Umlage von Fixkosten. So fallen die Missionskosten bei niedriger Reichweite von 132 km von zunächst 5,6 Mio. € (0 externe Flugtage) auf 230.000 € (2500 externe Flugtage) um den Faktor 24. Bei sehr hoher Reichweite von 1300

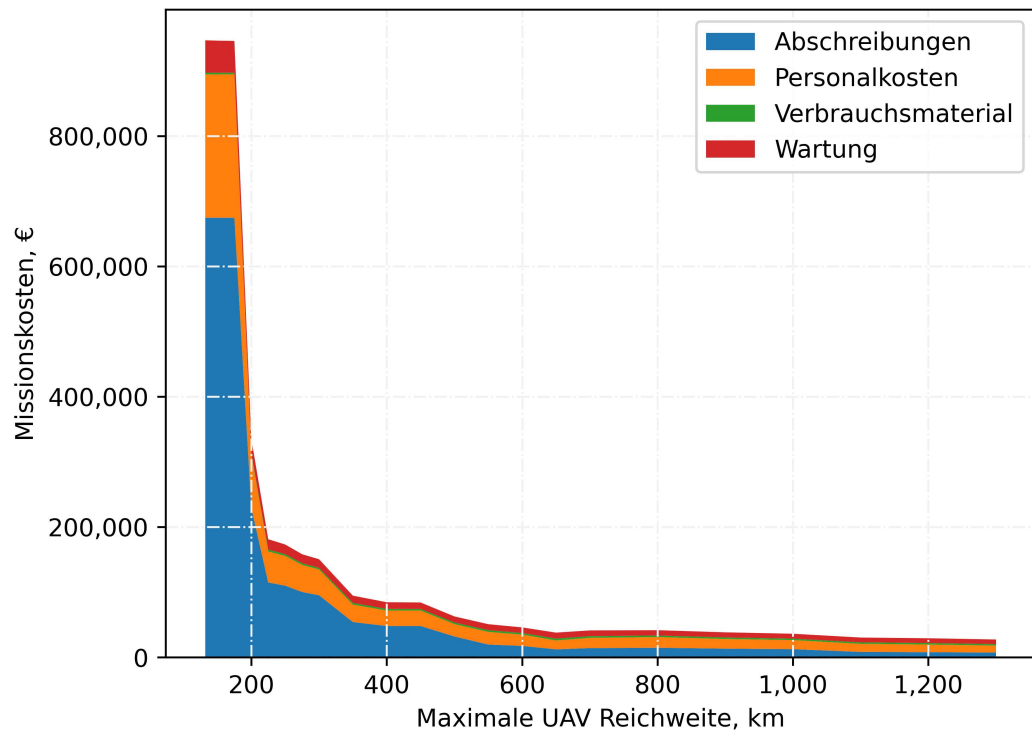


ABB. 5.31: Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration

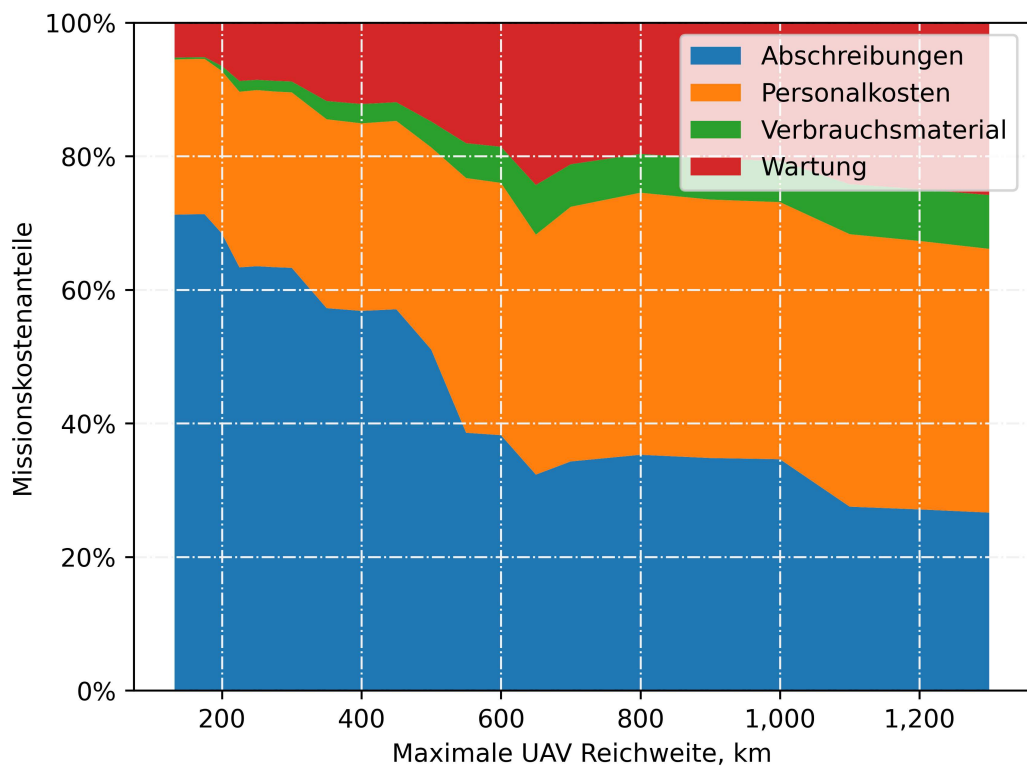


ABB. 5.32: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration

km sinken die Kosten von 230.000 € bei geringer Auslastung auf 17.000 € um den

Faktor 14. Während also das volle Spektrum an möglichen UAV Reichweiten erheblichen Kosteneinfluss durch den Auslastungsgrad des Gesamtsystems erfährt, ist dies für kürzere Reichweite in besonderem Maße relevant.

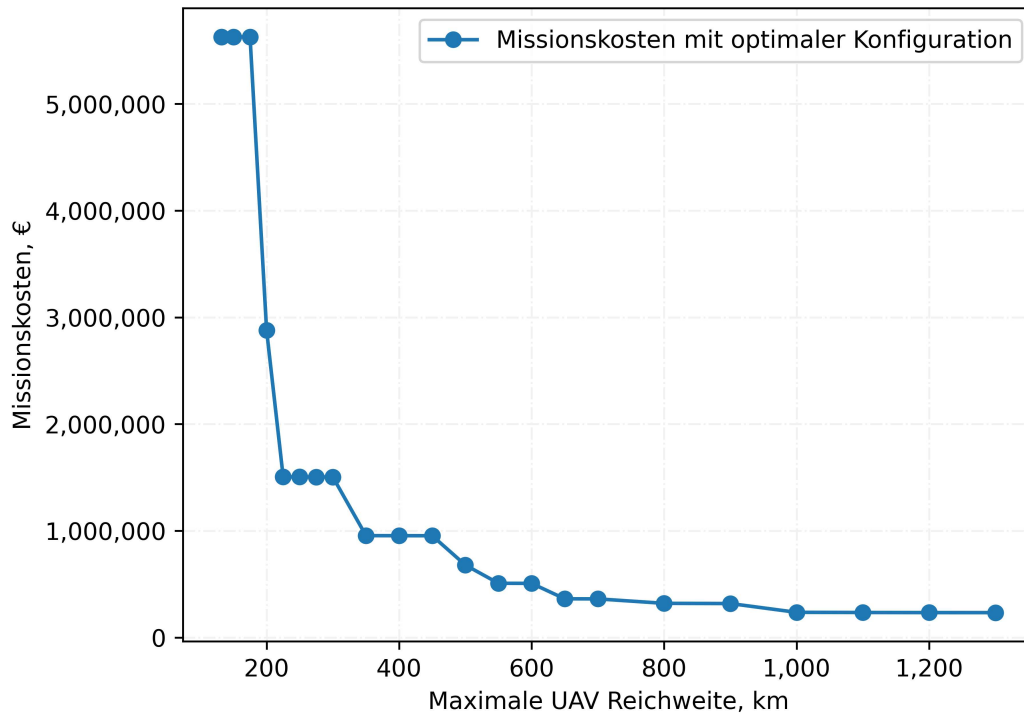


ABB. 5.33: Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

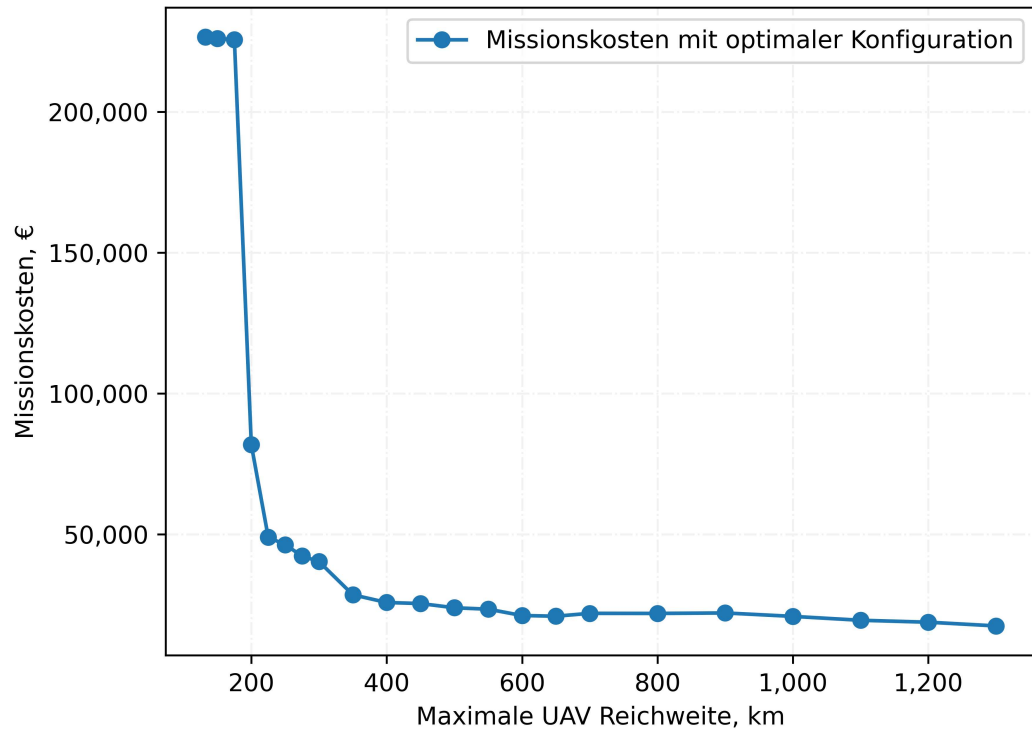


ABB. 5.34: Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

Abbildungen 5.35 und 5.36 zeigen den Einfluss der variierten Auslastung auf die Zusammensetzung der Kostenanteile. Der Verlauf ist dabei für beide Auslastungsgrade dem aus dem hochautomatisierten Starrflügelsystem sehr ähnlich. Unterschiede sind vor allem bei geringeren Anteilen an Wartungskosten und Abschreibungen bei der schlechteren Auslastung von 0 externen Flugtagen festzustellen, was aus den geringeren Investitionsausgaben für die Bodenstation folgt.

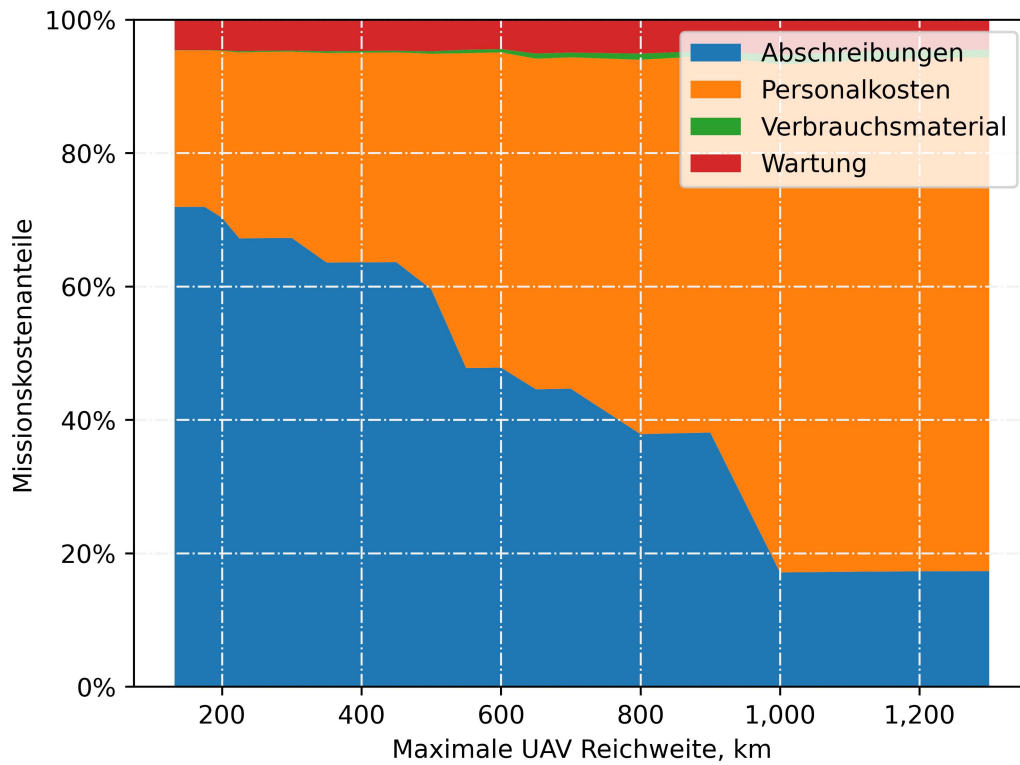


ABB. 5.35: Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen

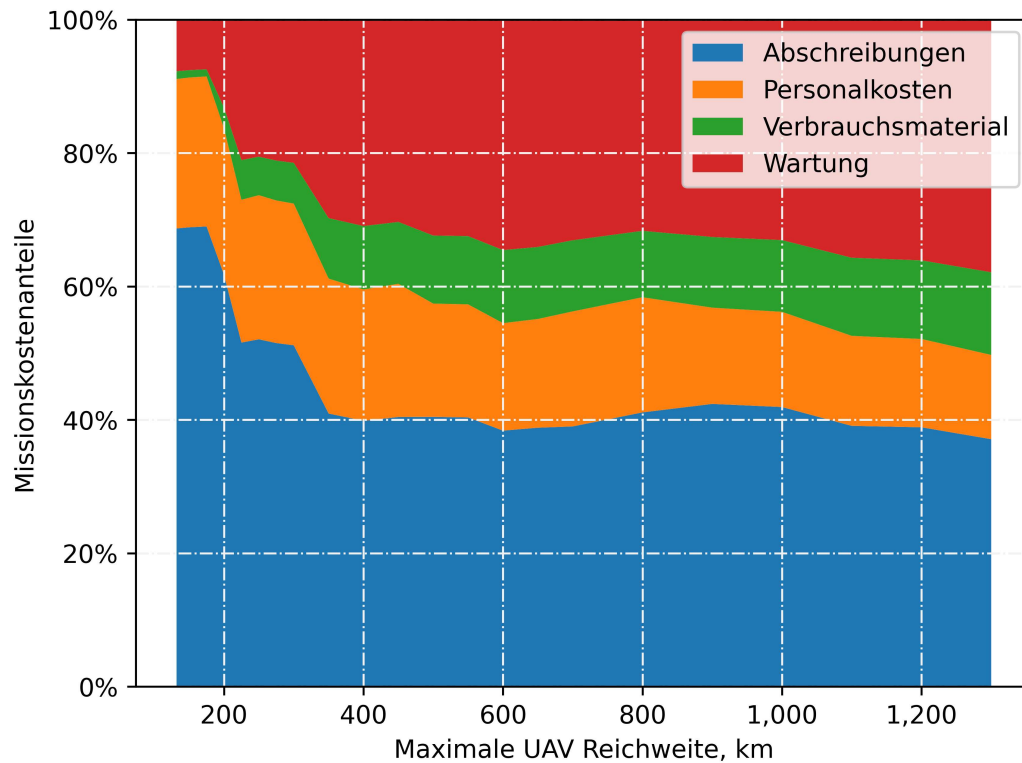


ABB. 5.36: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen

5.1.3.4 Satellit

Für Satelliten kann ein deutlich einfacheres Kostenmodell veranschlagt werden als dies für die Drohnenbefliegung notwendig ist, da die Daten hierfür als Zukauf beschafft werden und nicht in Eigenleistung erfolgen werden, sodass ein Stückkostenpreis je Streckenkilometer bzw. Fläche betrachtet werden kann. Wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, decken Satellitensysteme zur Erdbeobachtung je nach verwendeten Orbitalparametern den kompletten Globus oder zumindest die Breitengrade, in denen sich die Infrastruktur des deutschen Bahnnetzes befindet, vollständig ab und werden automatisch vollständig überflogen.

Da wie in Kapitel 2.3 dargestellt, die mindestens zu beschaffende Streifenbreite der Bilddaten entlang der Infrastruktur lediglich 1 km betragen kann, ist nicht damit zu rechnen, dass erhebliche Anteile der beschafften Flächendaten für direkt nebenan liegende Infrastrukturkilometer wiederverwendet werden können und somit die Beschaffungskosten gesenkt werden können.

Insofern kann in einem vereinfachten Kostenmodell abgeleitet aus Kapitel 2.3 davon ausgegangen werden, dass neues Satellitentasking mit 10 € je km Infrastruktur zu Buche schlägt, während für weniger zeitkritische Anfragen auf Archivdaten für 1 € je Infrastrukturkilometer zurückgegriffen werden kann.

Der Datensatz der deutschen Bahn enthält 34.335 Einträge zu Wegpunkten in einem Abstand von jeweils einem Kilometer. Kreuzungspunkte werden in dieser Betrachtung vernachlässigt. Entsprechend werden die zum Technologievergleich heranzuziehenden Gesamtmissionskosten auf 343.000 € für neues Tasking und 34.300 € für Archivdaten festgesetzt.

5.1.4 Vergleichende Systembewertung

Die oben ausgearbeiteten Kostenmodelle für teil- und hochautomatisierte Starrflügel und VTOL-Systeme bilden zusammen mit den Vergleichsdaten für Satellitendaten die Grundlage dafür, die verschiedenen Gesamtsystemansätze gegenüber zu stellen und unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Wie im Folgenden ersichtlich wird, hat die Systemauslastung großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit luftgestützter Datenerfassung.

Niedrige Auslastung Abbildungen 5.37 und 5.38 zeigen die Missionskosten der zum Vergleich stehenden Gesamtsystemkosten bei niedriger Auslastung, also ohne zusätzliche externe Flugtage aus anderen Missionen.

Deutlich wird, dass wenn nur Luftfahrzeuge mit geringen Reichweiten von ca. 200 km bis 300 km zur Verfügung stehen, die Gesamtmissionskosten um etwa den Faktor 10 über denen liegen, die die Beschaffung von extra angeforderten neuen Satellitendaten kosten würde. Gegenüber dem Bezug von Archivdaten liegen die Kosten zunächst sogar um den Faktor 100 höher. Die luftgestützten Inspektionskosten je Streckenkilometer liegen hierbei zunächst im Bereich von 200 € bis 400 € und fallen mit zunehmender Reichweite stark ab.

Während zwischen den luftgestützten Datenerhebungsmethoden zwar ein Unterschied um bis zu dem Faktor 2 besteht, verändert dieser gegenüber Satellitendaten jedoch nicht die grundsätzliche kostenbezogene Wettbewerbsfähigkeit.

Diese Lücke zwischen den Kostenniveaus satelliten- und luftgestützter Methoden schließt sich allerdings teilweise bei zur Verfügung stehenden größeren Reichweiten. Je nach verwendetem Drohnengesamtsystem wird eine Kostenparität mit neu angeforderten Satellitendaten zwischen 600 km und 1000 km zur Verfügung stehender Luftfahrzeugreichweite erreicht. Dies entspricht einem Streckenkilometer bezogenem Kostenniveau von etwa 10 €. Gegenüber Satellitenarchivdaten mit ca. 1 € je Streckenkilometer allerdings kann die Lücke unabhängig von der Reichweite nicht geschlossen werden.

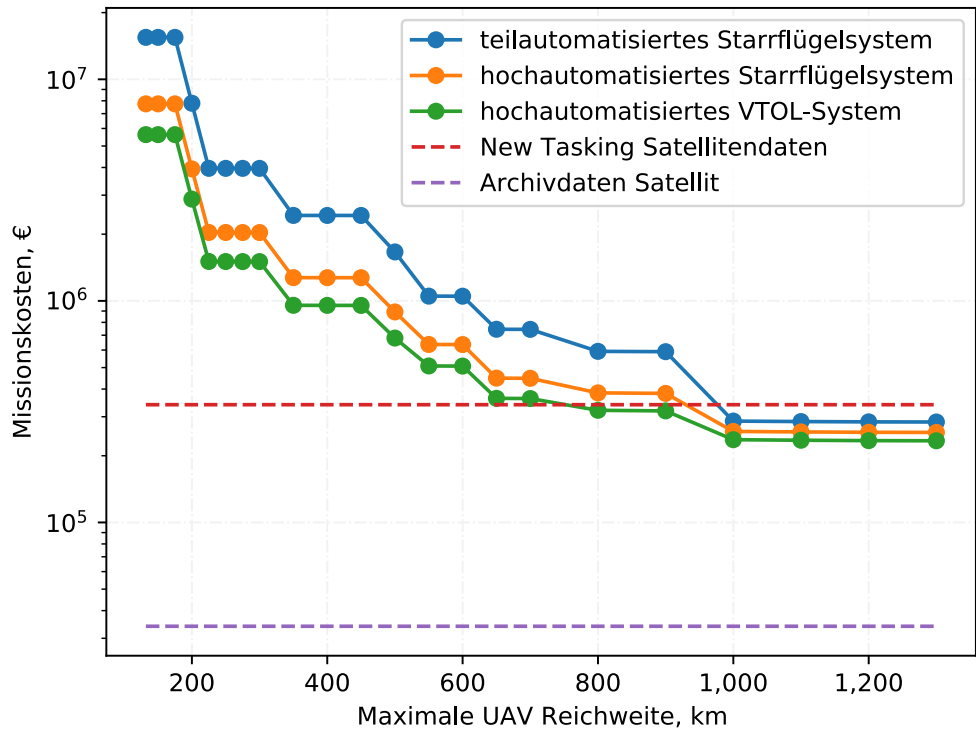


ABB. 5.37: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen

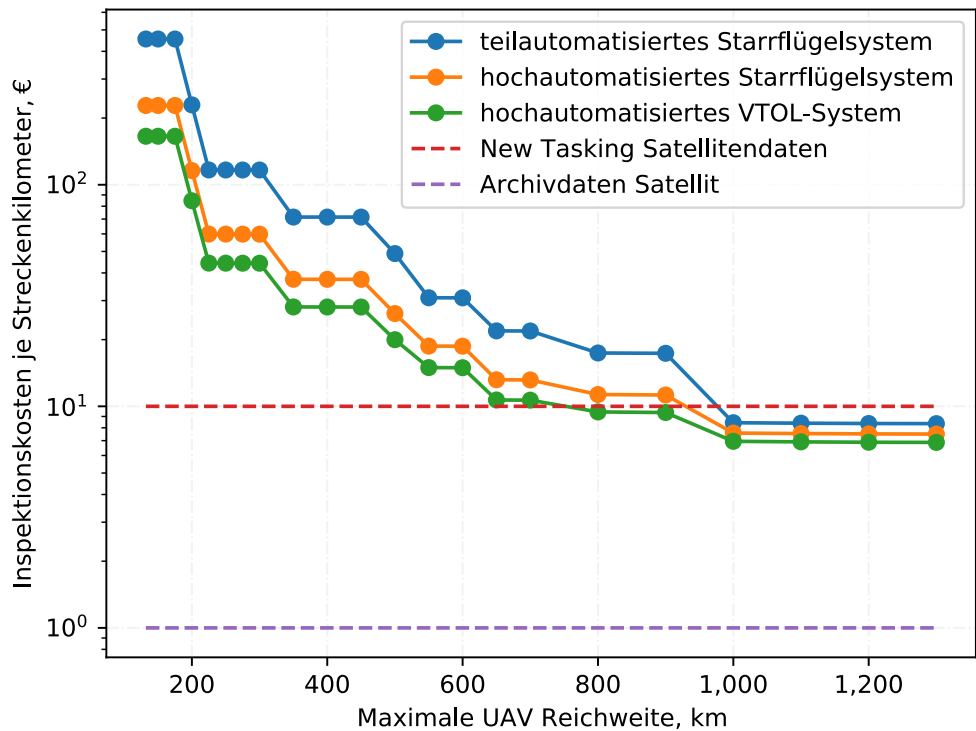


ABB. 5.38: Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen

Mittlere Auslastung Ein Szenario mittlerer Auslastung und 500 externen Flugtagen (Abbildungen 5.39 und 5.40) verbessert die Wettbewerbsfähigkeit luftgestützter Gesamtsysteme insgesamt bereits erheblich. So wird eine Kostenparität mit neu bezogenen Satellitendaten nun bereits im Reichweitenbereich von 200 km bis 300 km erreicht. Mit zu Verfügung stehender größerer Reichweite sinken die Streckenkilometerkosten aus dem Bereich von 10 € dann weiter bis auf das Kostenniveau für Satellitenarchivdaten im Bereich von 1 € je Kilometer.

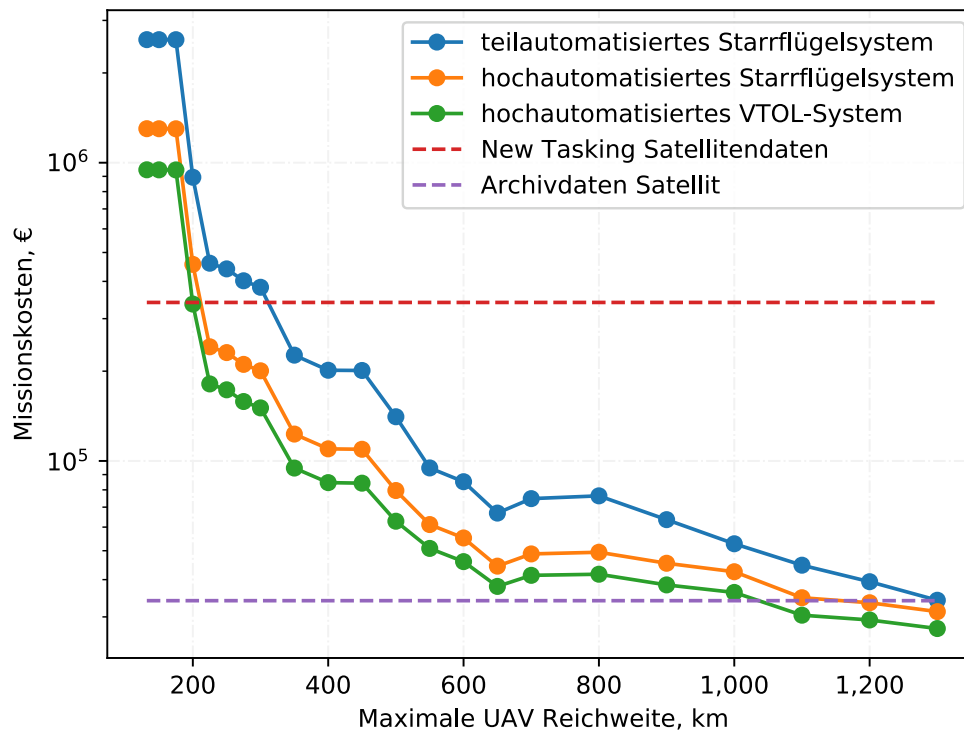


ABB. 5.39: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen

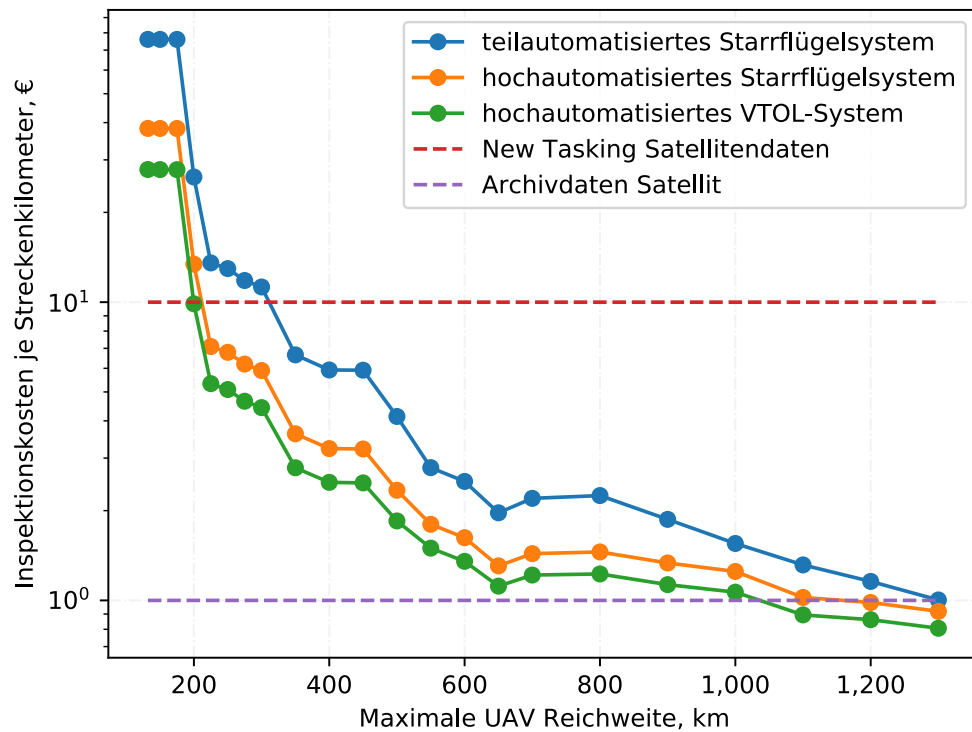


ABB. 5.40: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen

Hohe Auslastung Werden die drohnengestützten Gesamtsysteme mit 2500 externen Flugtagen (Abbildungen 5.41 und 5.42) jedoch hoch ausgelastet, können sie durch die so gehobenen Skaleneffekte nochmals wesentlich verbesserte Kostenniveaus erreichen und bereits bei den geringsten untersuchten Reichweiten preislich mit neuen Satellitendaten konkurrieren. Relativ schnell, je nach Gesamtsystem zwischen 300 km und 500 km, fallen die streckenkilometerbezogenen Kosten dann sogar unter das Niveau von 1 €/km für Satellitenarchivdaten. Im Extremfall eines hochautomatisierten VTOL-Systems mit 1300 km Reichweite kann das Kostenniveau für neue Satellitendaten sogar um mehr als 50% unterboten werden.

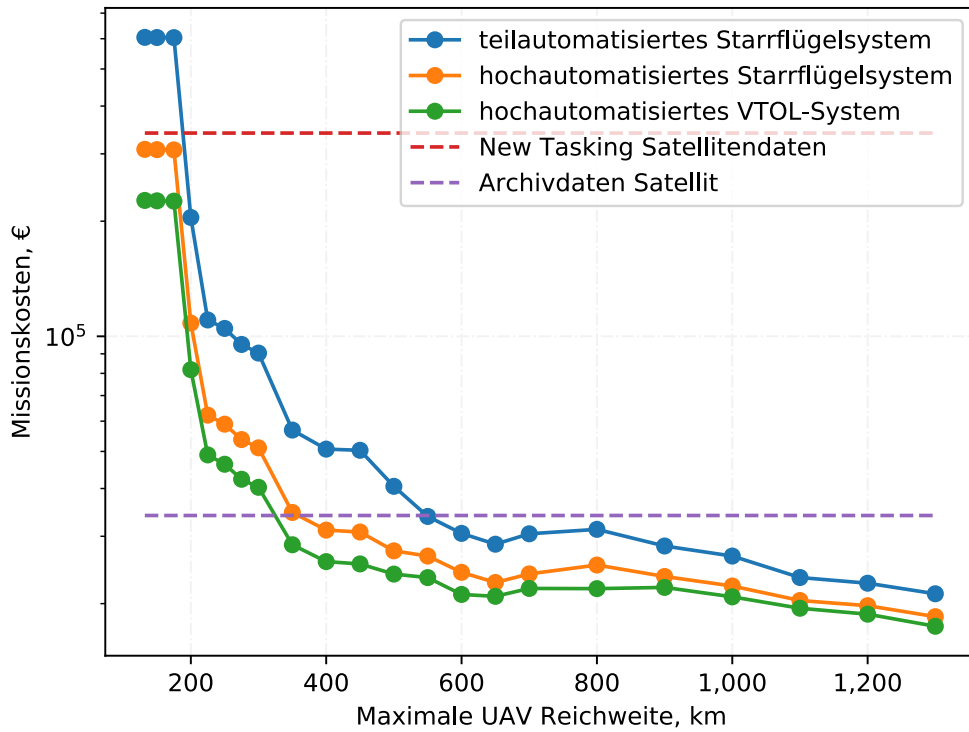


ABB. 5.41: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen

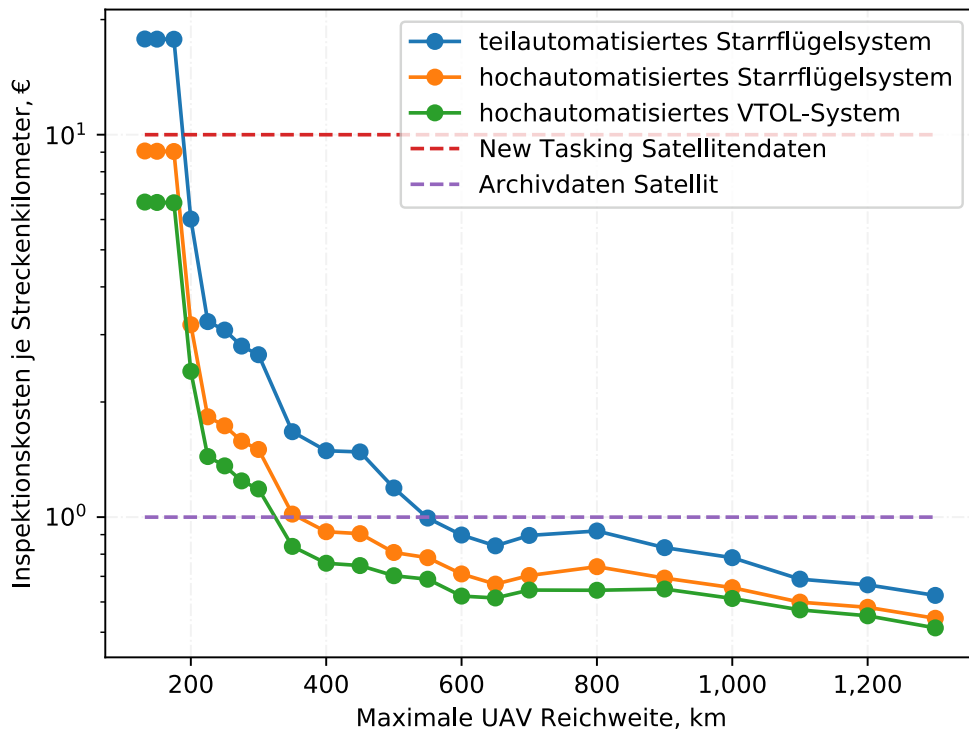


ABB. 5.42: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen

Wie unabhängig von der angenommenen Auslastung innerhalb der luftgestützten Gesamtsysteme festzustellen ist, erzielt das hochautomatisierte VTOL System für jede verfügbare Reichweite stets die günstigsten Missionskosten und damit einhergehende Streckenkilometerinspektionskosten. In einigem Abstand hierzu folgt dann das hochautomatisierte Starrflügelssystem mit bodengebundenem Start-/Landesystem und in einem deutlich größeren Abstand schließlich das teilautomatisierte Starrflügelssystem.

Wert inkrementeller Reichweite Während diese Reihenfolge bei konstanter Reichweite unverändert ist, können hochautomatisierte Starrflügelssysteme theoretisch allerdings dennoch Kostenvorteile gegenüber VTOL-Systemen erzielen, sollte durch die effizientere Start-/Landemethode ein Flugzeugentwurf mit größerer Reichweite ermöglicht werden. Dies würde durch die Ermöglichung einer dünneren Startbasenkonfiguration eine Einsparung in der Anzahl benötigter Systeme zur Folge haben, was insgesamt zu geringeren Missionskosten führen kann.

Insofern stellt sich vor allem die Frage, welchen Wert eine inkrementell vergrößerte Reichweite² im Kontext einer bestimmten Mission liefert. Abbildung 5.43 zeigt hierfür die Missionskosteneinsparungen bezogen auf einen zusätzlichen Kilometer Reichweite für die jeweils kostenoptimale Konfiguration bei einer zur Verfügung stehenden Reichweite. Hierbei bildet sich klar ab, dass der Mehrwert zusätzlicher Reichweite stark abhängig ist vom Reichweitenbereich, den das UAV bereits abdecken kann. Für das deutsche Bahnnetz sinken die Gesamtmissionskosten mit zusätzlicher Reichweite besonders stark im Bereich der erforderlichen ökonomischen Mindestreichweite um 200 km, unterhalb derer die Befliegungskosten prohibitiv hoch sind.

Diese Erkenntnisse sind von besonderer Relevanz für Hersteller von UAV, da sie hieraus Rückschlüsse auf die Zahlungsbereitschaft der Kunden für verbesserte Spezifikationen ziehen können, wenn durch einen Trade-off mit höheren Herstellkosten eine größere Reichweite erzielbar ist. Abbildung 5.44 stellt aus diesem Grund den Wert inkrementeller Reichweite bezogen auf ein einzelnes UAV dar, um den individuellen Mehrwert je Vehikel zu erfassen.

Für beide Abbildungen zum Mehrwert inkrementeller Reichweite sei darauf hingewiesen, dass diese keine kontinuierlichen differenzierten Ableitungen im mathematischen Sinne darstellen, da die Missionskonfigurationen in diskreten Reichweiteschritten untersucht wurden. Folglich wurde zu diesem Zweck der Mehrwert je km Reichweite jeweils bis zum nächsten Reichweiteschritt ermittelt. Dies bedeutet, dass ein einzelner hinzugefügter Reichweitenkilometer in nur im Mittel der Umgebung die hier errechneten Vorteile birgt.

²Inkrementelle Reichweite meint die erste Ableitung der Reichweite und bezieht sich auf eine geringe (inkrementelle) Reichweitensteigerung bei einem bestimmten Reichweitenwert.

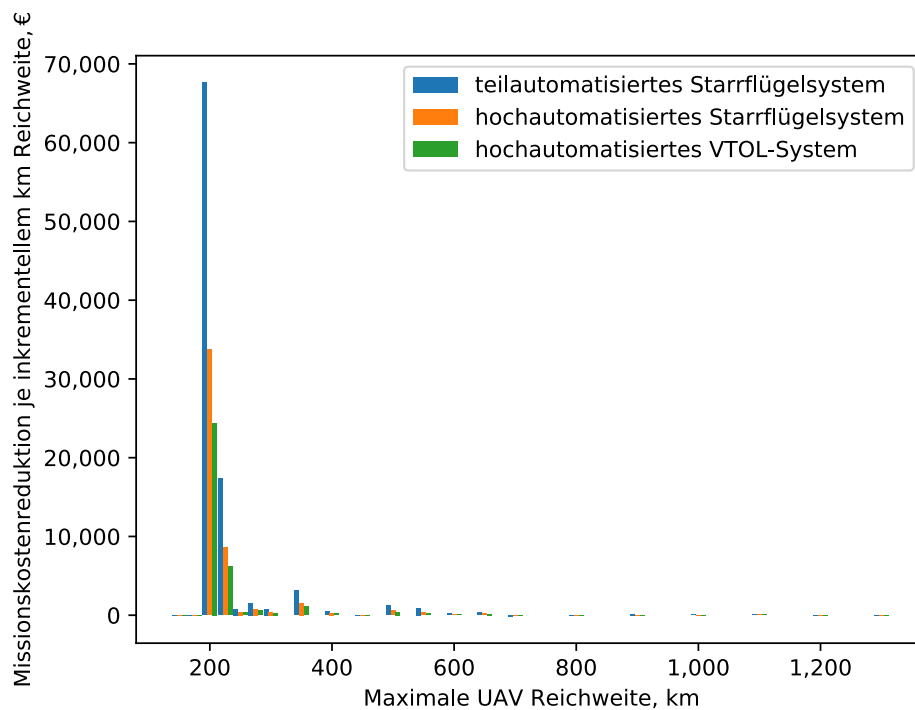


ABB. 5.43: Missionskosteneinsparungen je km zusätzlicher UAV Reichweite

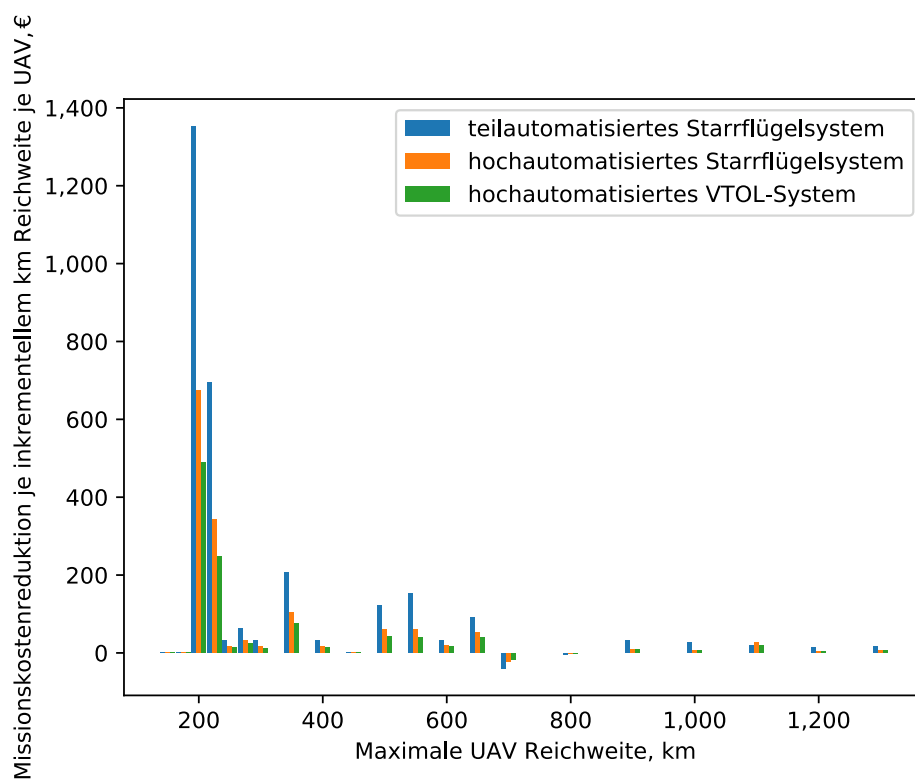


ABB. 5.44: Missionskosteneinsparungen je einzeltem UAV je km zusätzlicher UAV Reichweite

Für die Fallstudie des deutschen Bahnnetzes kann so im Vergleich zwischen zwischen den drohnen- und satellitengestützten Gesamtsystemen geschlussfolgert werden, dass die kostenbezogene Wettbewerbsfähigkeit von Drohnensystemen im Allgemeinen sehr stark von einer hohen Auslastung abhängig ist. Eine einmalige Befliegung pro Jahr nur des deutschen Bahnnetzes dürfte keine ausreichende wirtschaftliche Rechtfertigung darstellen, um in ein Drohnensystem gleich welcher Art zu investieren.

Dies dürfte jedoch auch eine unrealistisch konservative Annahme sein. Denn bereits eine vollständige Befliegung alleine dieser Infrastruktur im regelmäßigen Abstand von 6 Wochen würde die Gesamtauslastung mit mehr als 500 zusätzlichen (missionsexternen) Flugtagen auslasten und je nach zur Verfügung stehender Reichweite die Kostenniveaus von neu beauftragten Satellitenaufnahmen bzw. Satellitenarchivdaten erreichen. Eine hohe Auslastung von 2500 missionsexternen Tagen könnte beispielsweise durch eine zweiwöchige Befliegung dieser und mindestens einer weiteren Infrastruktur diesen Ausmaßes wie beispielsweise dem Hochspannungsstromnetz erreicht werden. Bei diesem Skalierungsniveau wären deutliche Kostenvorteile gegenüber Satellitendaten gleich welcher Art zu realisieren, was einen starken ökonomischen Anreiz darstellen würde und eine Investition durchaus rechtfertigen könnte.

5.2 Erdgas Fernleitungen USA

Die zweite Fallstudie befasst sich mit Inspektionsflügen des US-amerikanischen Erdgasfernleitungssystems, für welches Daten von der *U.S. Energy Information Administration (2018)* bereitgestellt werden. Pipelines werden im Allgemeinen auf Aspekte wie unerlaubte Bauarbeiten, Korrosion, Leckagen und Vegetationsstörungen, u.a. *Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2018)*; *American Society of Mechanical Engineers (2004)* überprüft. Während die für die Luftinspektion geeigneten Inspektionsaufgaben im Allgemeinen international ähnlich sind, variieren die detaillierten Vorschriften und Inspektionsintervalle von Land zu Land *United Nations Economic Commission for Europe (2021)*.³ Kapitel 5.2.1 analysiert unabhängig von den Inspektionsintervallen ein einmaliges Überfliegen der Infrastruktur. Ähnlich wie bei Inspektionen von Eisenbahnstromleitungen werden in dieser Arbeit die Anforderungen an Sensoren nur auf eine qualitative oder semiquantitative Weise (in Kapitel 5.2.3) erörtert.

5.2.1 Routenoptimierung

Da das Festland der Vereinigten Staaten ein deutlich größeres Einsatzgebiet im Vergleich zum deutschen Schienennetz (vgl. Kapitel 5.1.2) darstellt und die

³Für Details zu den Inspektionsanforderungen sei der Leser an Kapitel 3.2 verwiesen.

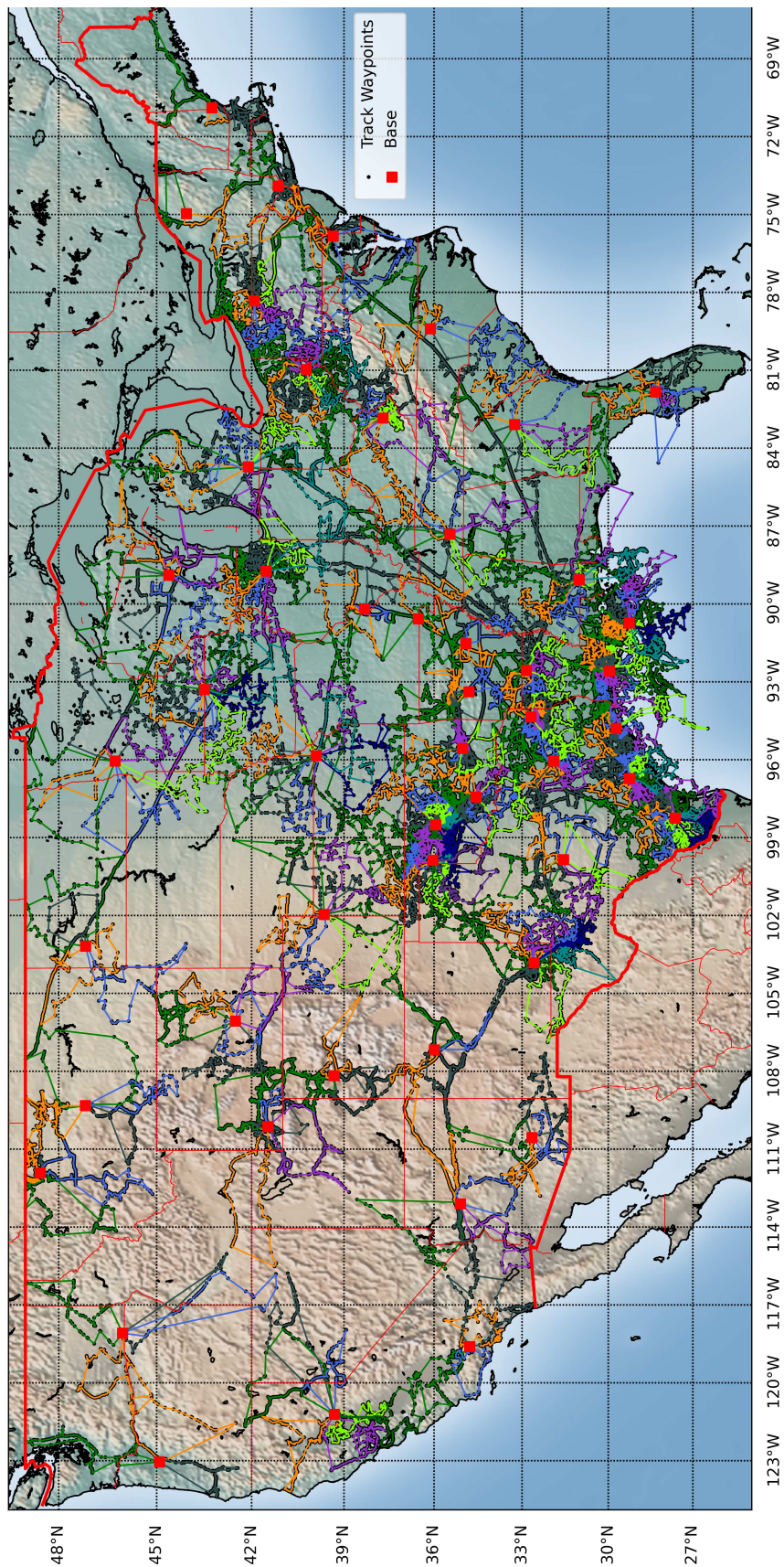


ABB. 5.45: Routing Lösung für das US Erdgas Fernleitungsnetz mit 50 Betriebsbasen und 1300 km verfügbarer Reichweite

Gaspipeline-Infrastruktur gegenüber Eisenbahninfrastruktur auch andere geometrische Eigenschaften aufweist, variieren die Ergebnisse für die Missionslänge und die durchschnittliche Reichweitennutzung hinsichtlich der UAV-Reichweite und der Basiskonfigurationen im Gegensatz zum vorherigen Fall. Offensichtlich besteht die Tendenz, dass die effizientesten Konfigurationen im Vergleich zur Fallstudie des Schienennetzes mehr Basen aufweisen (siehe Abb. 5.46). Untersucht wurden Konfigurationen von 30 bis 2000 Basen im Vergleich zu 1 bis 100 Basen für die Deutsche Bahn.

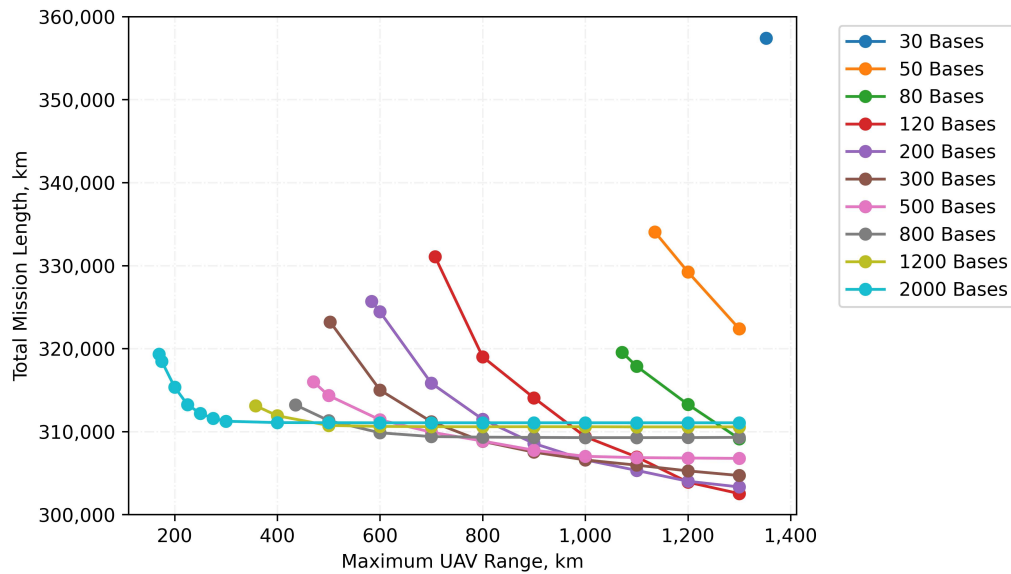


ABB. 5.46: Pipeline - Durchschnittliche Reichweitennutzung

Außerdem zeigen UAVs mit größerer Reichweite tendenziell einen deutlich ausgeprägteren Vorteil gegenüber Versionen mit kürzerer Reichweite, da zusätzliche Reichweite innerhalb einer bestimmten Konfiguration tatsächlich effizient angewendet werden kann, sodass die durchschnittliche Reichweitennutzung nur langsam abfällt (siehe Abb. 5.47).

Auffällig ist auch, dass insbesondere für dichte Basiskonfigurationen die durchschnittliche Ausnutzung der Reichweite bereits im Reichweitenbereich zwischen 150 km bis 400 km deutlich abnimmt, während dies im Falle des deutschen Bahnnetzes zumindest nicht in diesem Ausmaß und bei derart geringen Reichweiten zu beobachten ist. Dementsprechend erreichen sie ihr Missionslängenoptimum bei gegebener Basenpositionierung bereits bei viel geringeren UAV-Reichweiten ohne weitere Verbesserungen der Missionslänge. Als Grund hierfür könnte der Umstand vermutet werden, dass die Zielinfrastruktur selbst deutlich spärlicher über das Zielgebiet verteilt ist: Dies könnte einerseits zur Folge haben, dass inkrementelle Reichweite seltener dazu führt, dass neben dem Primärzielinfrastruktur noch ein Sekundärziel als “Beifang auf dem Rückweg” abgedeckt werden kann und somit der Missionsanteil über der Zielinfrastruktur für sehr dichte Basenkonfigurationen geringer ausfällt. Weiterhin deutet die frühe Abnahme der nutzbaren

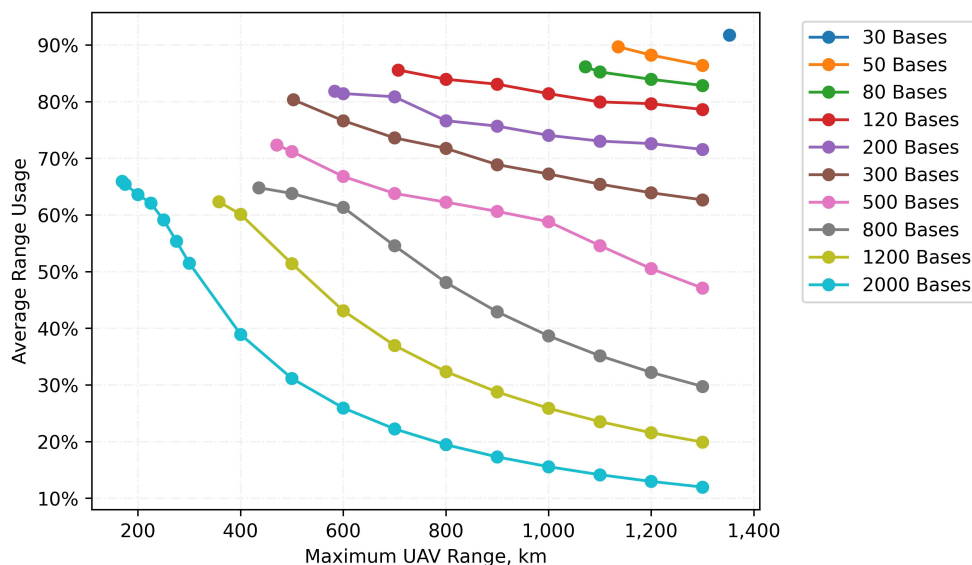


ABB. 5.47: Pipeline - Durchschnittliche Reichweitennutzung

Reichweite in dieser Zielverteilung möglicherweise auf einen Effekt des k-means-Clusteralgorithmus hin, welcher ab einer gewissen Anzahl Betriebsbasen diese so dicht aneinander platziert, dass insbesondere Teilzielgebiete, durch welche nur eine einzelne Pipeline führt, regional zu wenige Ziele im Einzugsgebiet aufweisen, um die Fähigkeiten der Drohnen auszunutzen. Würde die praktikable UAV-Reichweite im Modell nicht durch die verfügbare Flugzeit mit Tageslicht limitiert werden, würden von noch höhere Reichweiten insbesondere spärlichere Konfigurationen weiter profitieren und an Effizienz gewinnen. Dies könnte mitunter durch schneller fliegende UAV erreicht werden.

Gegenüber der Befliegung des wesentlich dichteren deutschen Bahnnetzes zeigt Abbildung 5.48 beim Anteil der Gesamtmissionslänge über der Zielinfrastruktur, wesentlich geringere Werte von maximal etwa 63%. Vereinfacht ausgedrückt kann insbesondere bei sehr dichten Basenkonfigurationen häufig kein produktiver Rückweg innerhalb einer Rundtour gefunden werden, da die Pipelines zu weit voneinander entfernt liegen. Dies hat dann zur Folge, dass für eine erhebliche Anzahl an Routen nur ein unidirektionaler Weg produktiv genutzt werden kann und somit größere Ineffizienzen entstehen. Dünnere Basenkonfigurationen mit ausreichend großer Reichweite sind hiervon weniger stark betroffen, da das zu einer Betriebsbasis gehörende Operationsgebiet dann zunehmend ausreichend groß wird, um doch nahezu vollständige Rundtouren über Zielinfrastruktur abdecken zu können. Wären noch größere Reichweiten innerhalb eines Tageslänge befliegbar und im Luftfahrzeugdesign umsetzbar, so wäre durchaus zu erwarten, dass sich für noch dünnere Basenkonfigurationen ähnliche Nutzungsgrade ergeben könnten wie beim deutschen Bahnnetz zu beobachten.

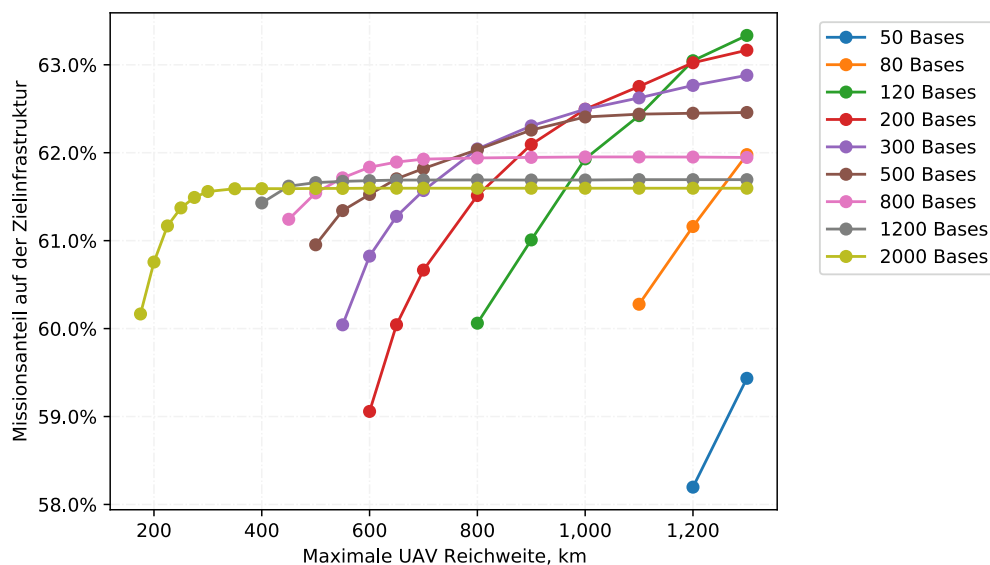


ABB. 5.48: Anteil der Missionsstrecke über der Zielinfrastruktur

Insgesamt zeigt die Auswertung der bei der jeweils optimalen Betriebsbasenkonfiguration minimalen Missionslänge in Abbildung 5.49 ein deutlich anderes Verhalten im Vergleich zur Fallstudie des deutschen Bahnnetzes: Dadurch, dass besonders spärliche Konfigurationen erhebliche Effizienzvorteile erzielen können, können auch im Bereich sehr großer Reichweiten noch deutliche Reduktionen der Gesamtmissionslänge erreicht werden, sodass ein asymptotisches Verhalten wie im vorhergehenden Fall nicht zu beobachten ist.

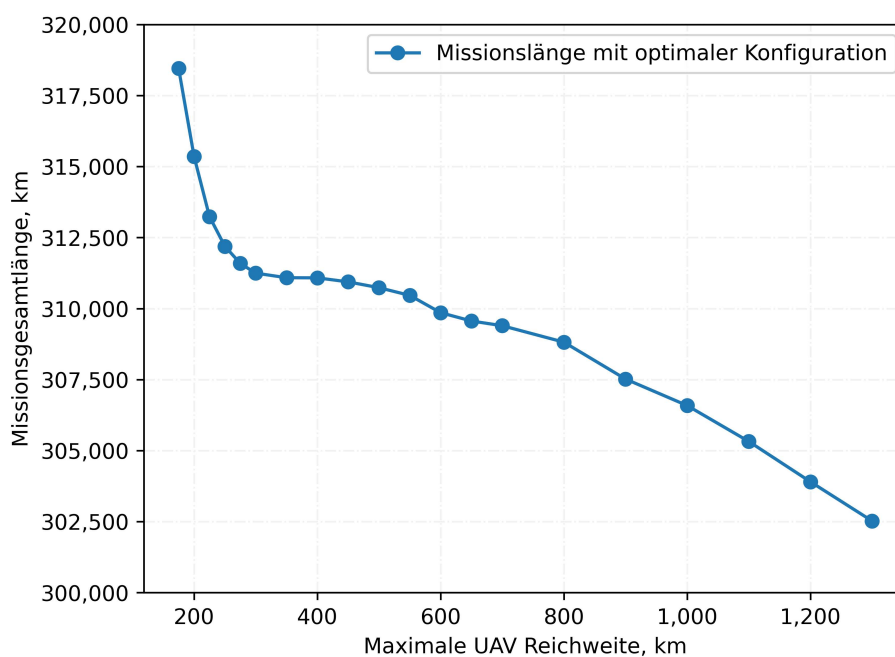


ABB. 5.49: Minimale Gesamtmissionslänge bei jeweils optimaler Basenkonfiguration

5.2.2 Kostenoptimierung

Für das US-amerikanische Pipeline Fernleitungssystem spiegeln die Kostenmodelle die größere geographische Ausdehnung der Infrastruktur im Vergleich zum deutschen Bahnnetz wieder. Dieselben drei zuvor verwendeten technischen Systeme zur luftgestützten Datenerfassung verwendend, ergeben sich für alle Systemkonzepte nicht nur insgesamt höhere Missionskosten, resultierend aus der extensiveren Infrastruktur, sondern auch höhere streckenkilometerbezogene Kosten, welche aus der geringeren Infrastrukturdichte resultieren. Dies wird im Folgenden für die einzelnen Systemkonzepte weiter ausgeführt.

5.2.2.1 Starrflügel UAV - teilautomatisierter Betrieb

Beginnend mit dem teilautomatisierten Starrflügelsystem beschrieben in Kapitel 4.2.1 zeigen Abbildungen 5.50 und 5.51 die Gesamtmissionskosten abhängig von der zur Verfügung stehenden Reichweite einerseits für jede untersuchte Betriebsbasenkonfiguration (links) und andererseits für die jeweils kostenoptimale Konfiguration (rechts). Hierbei ergibt sich je nach verfügbarer Reichweite eine extrem starke Kostenspreizung zwischen 245 Mio. € und 2,90 Mio. €.

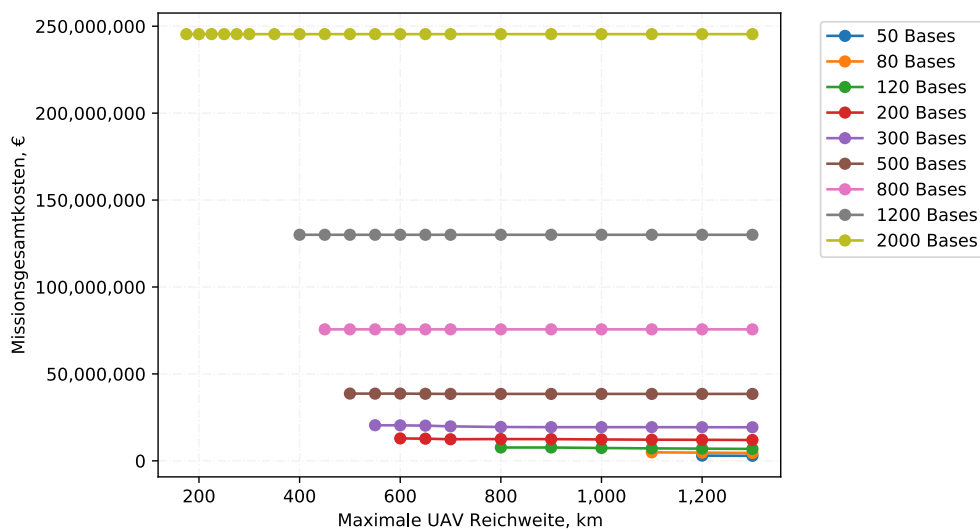


ABB. 5.50: Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen

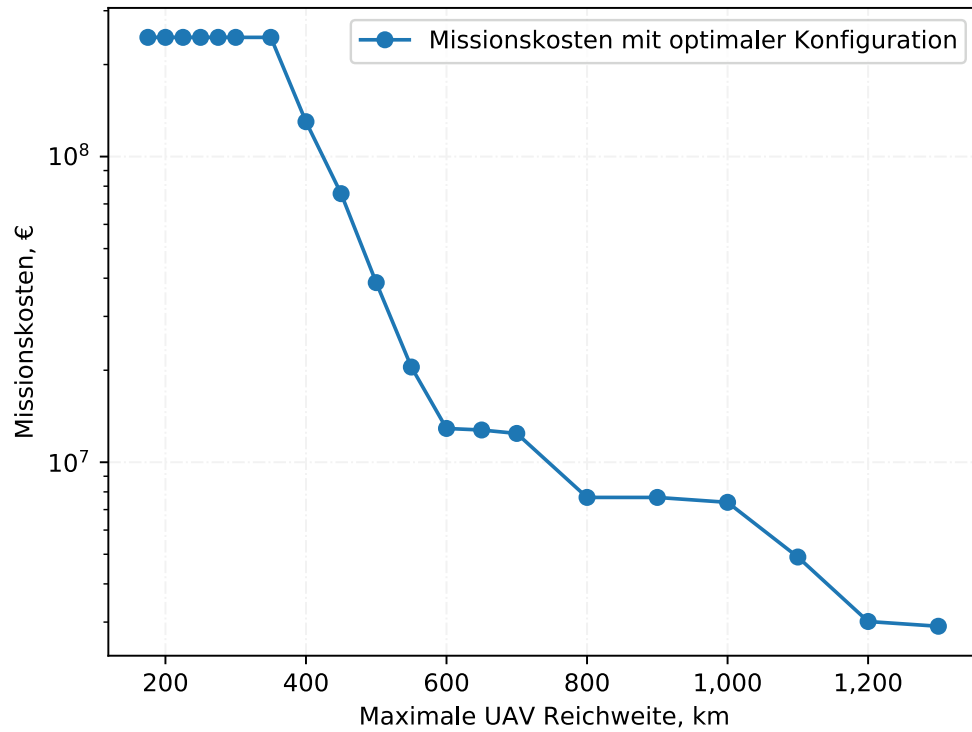


ABB. 5.51: Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

Wie aus den Abbildungen 5.52 und 5.53 zu lesen ist, ist das wesentlich erhöhte Niveau fast ausschließlich durch die von der Vielzahl an Betriebsbasen verursachten Fixkosten getrieben: Nahezu unabhängig von der betrachteten Reichweite verursachen Personalkosten etwa 80% der Kosten, gefolgt von weiteren ca. 20% an Personalkosten.

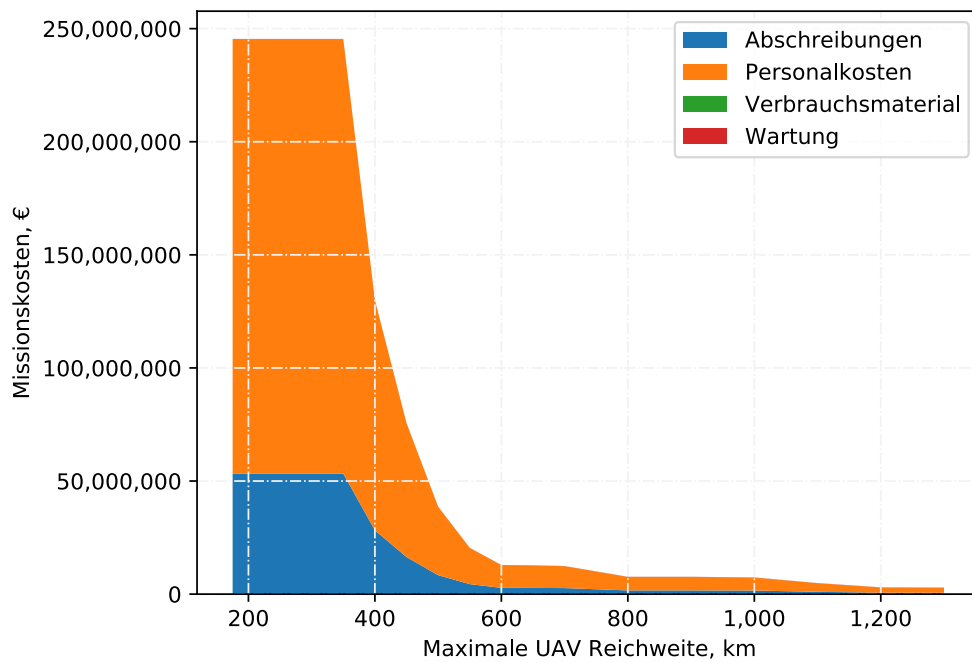


ABB. 5.52: Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration

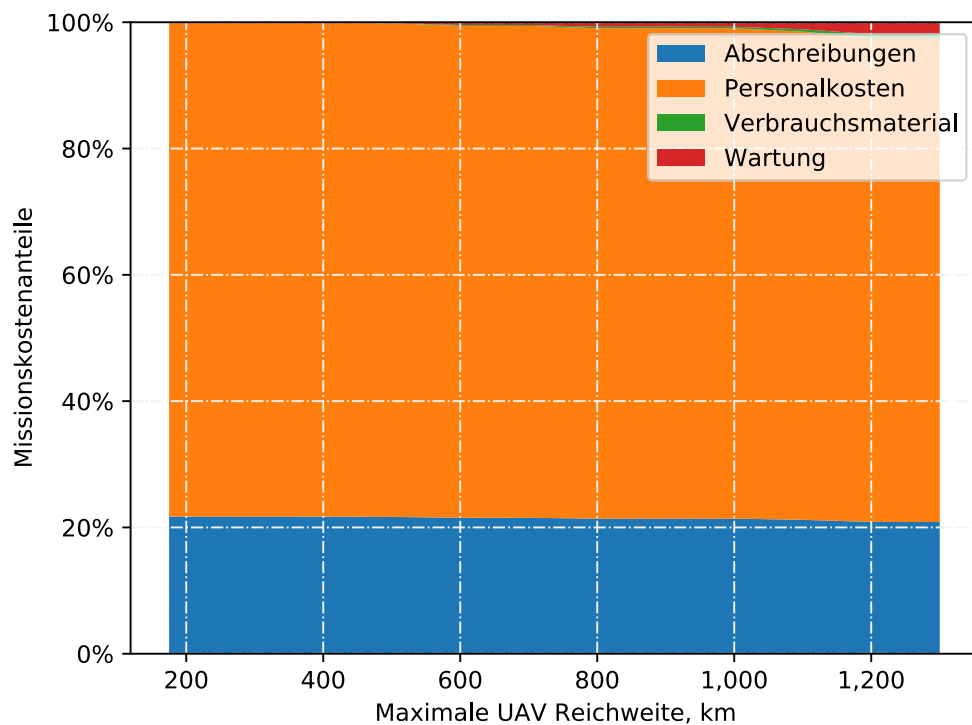


ABB. 5.53: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration

Um den Einfluss einer verbesserten Auslastung zu untersuchen, wurden ebenso wie beim vorhergehenden Anwendungsfall die Auswirkungen keiner (Abb. 5.54) bzw. 2500 missionsexterner Flugtage (Abb. 5.55) untersucht. Auf Grund der deutlich

höhere Betriebsbasenanzahl fällt der Unterschied jedoch deutlich geringer aus als beim deutschen Bahnnetz. Um noch größere Kostensenkungen durch eine verbesserte Auslastung der Fixkosten von Personal und Kapital (Abbildungen 5.57 und 5.57) zu erhalten, müssten noch wesentlich mehr externe Flugtage hinzugefügt werden.

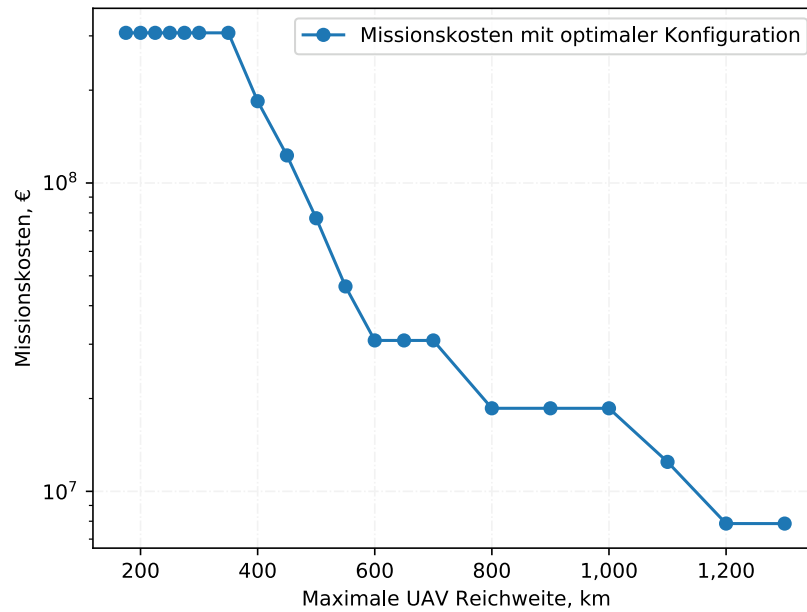


ABB. 5.54: Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

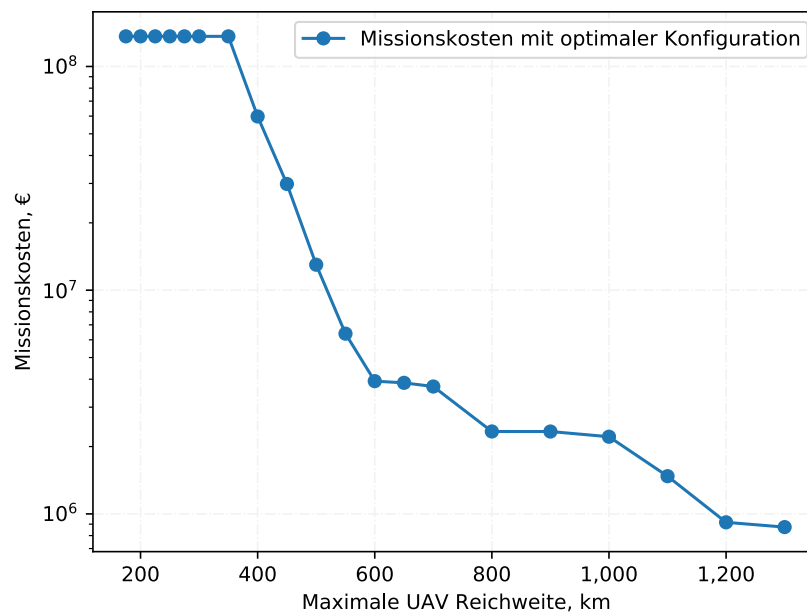


ABB. 5.55: Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

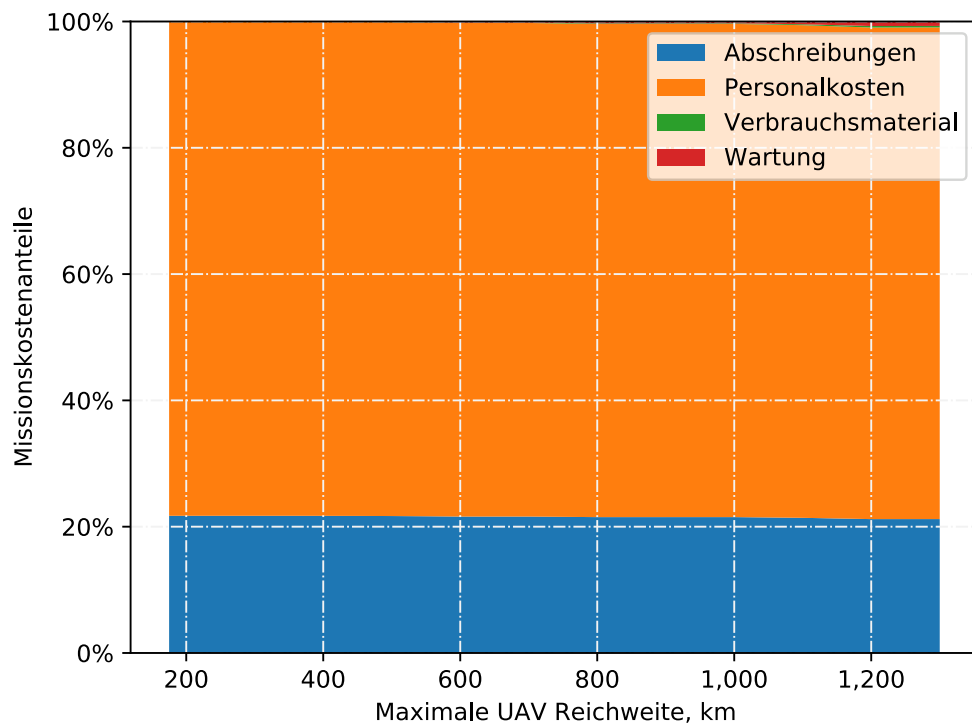


ABB. 5.56: Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen

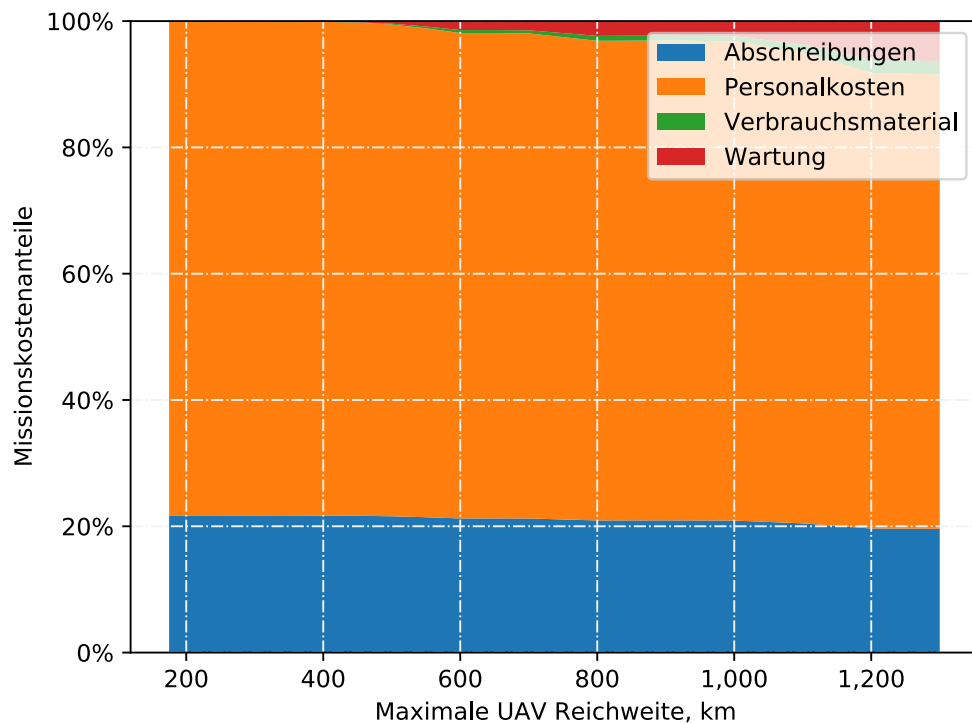


ABB. 5.57: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen

5.2.2.2 Starrflügel UAV - hochautomatisierter Betrieb

Ebenso wie beim deutschen Bahnnetz zeigt der hochautomatisierte Betrieb der Starrflügel UAV mittels automatischem Start- / Landesystem erhebliche Kostenvorteile gegenüber der teilautomatisierten Variante (Abbildungen 5.58 und 5.59). Bei vergleichsweise geringen Reichweiten halbieren sich die Gesamtmissionskosten auf knapp über 120 Mio. € und fallen dann mit dem Wechsel auf dünnere Basiskonfigurationen stark ab auf nur noch etwa 1,5 Mio. €. Bemerkenswerterweise ist der Kostenunterschied zwischen den kleinsten und größten Reichweiten mit dem Faktor 81 wesentlich ausgeprägter als beim Anwendungsfall des deutschen Bahnnetzes, wo diese Spreizung beim hochautomatisierten System nur einen Umfang von 41 hatte. Dies ist der Fall, obwohl die minimal erforderliche Reichweite mit 175 km gegenüber 132 km wesentlich höher liegt und die untersuchte Bandbreite somit geringer ist. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass bei einer dünnen Infrastruktur der Mehrwert von zusätzlicher Reichweite besonders stark ausgeprägt ist, da diese die Voraussetzung für den Sprung auf fixkostengünstigere Basiskonfigurationen sind.

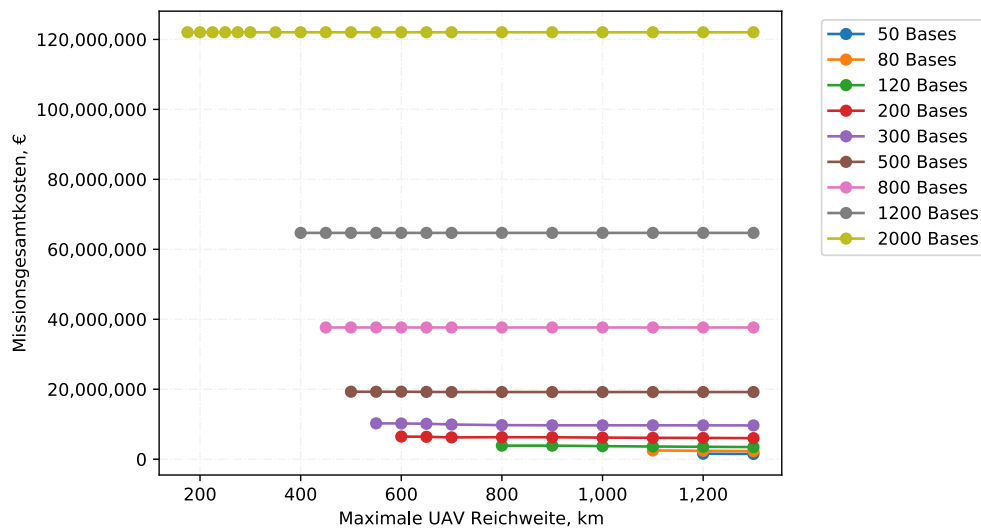


ABB. 5.58: Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basiskonfigurationen

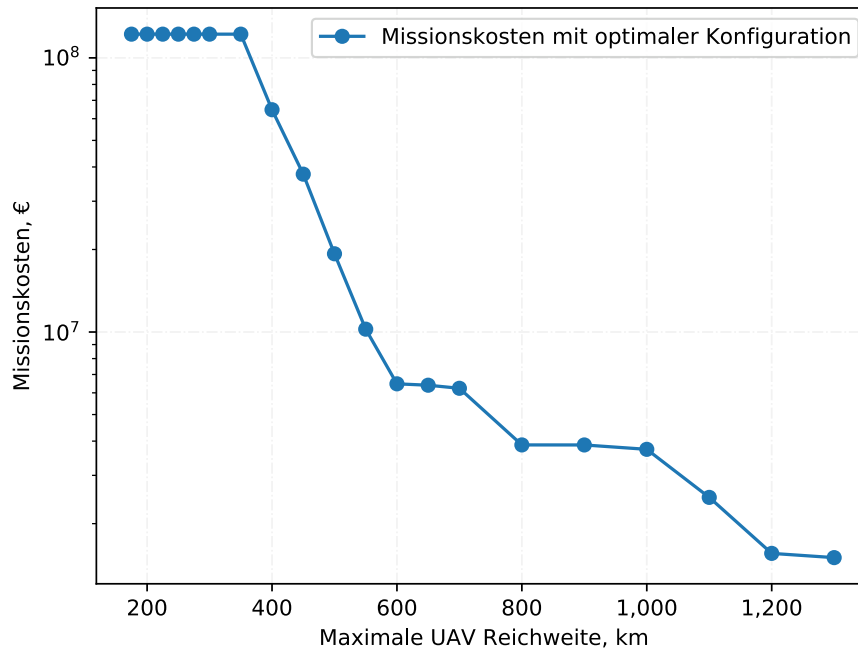


ABB. 5.59: Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

Die beim teilautomatisierten System noch sehr ausgeprägte Dominanz der Personalkosten dreht sich beim teilautomatisierten System um, welches mit über 70% vornehmlich von fixen Kapitalkosten bestimmt wird (Abbildungen 5.60 und 5.61). Durch zusätzliche Wartungsanteile für das Bodensystem werden nun die Gesamtwartungskosten durch deren Fixkostenanteil ebenfalls sichtbar.

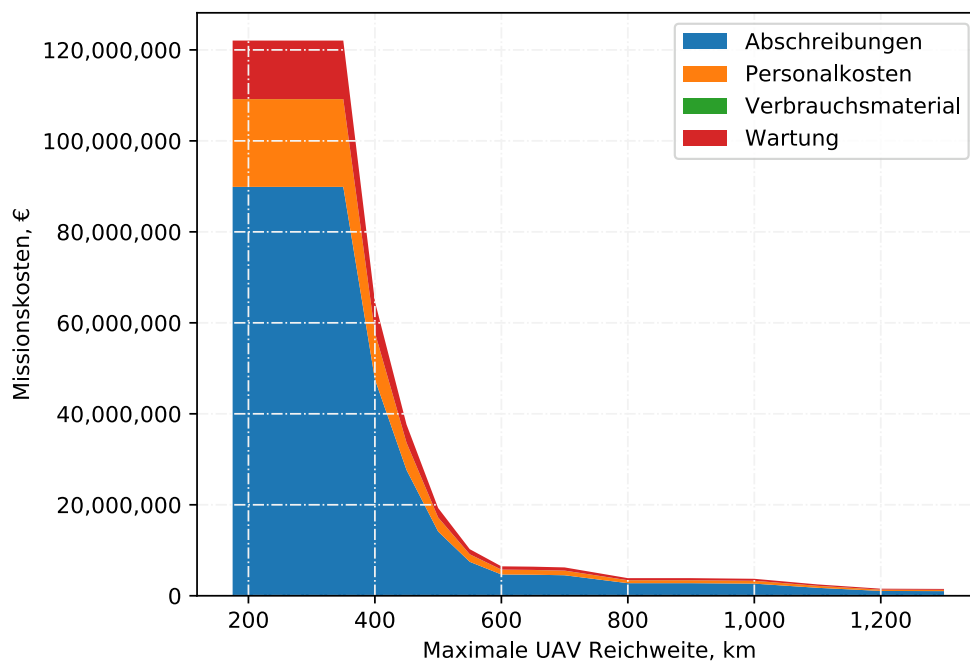


ABB. 5.60: Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration

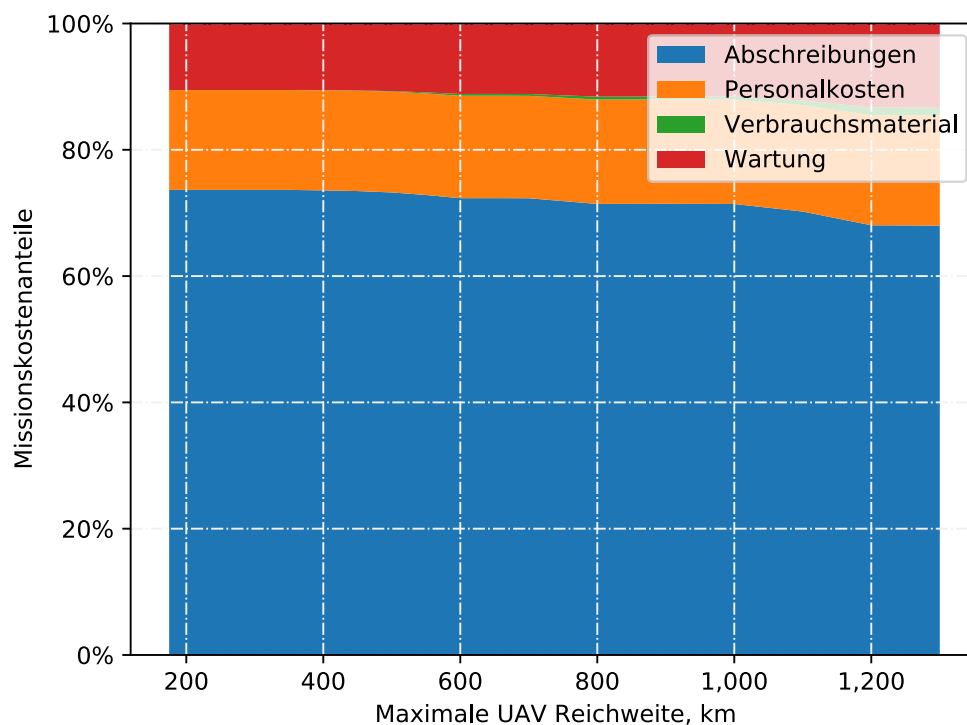


ABB. 5.61: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration

Die Analyse bei veränderter Auslastung bei 0 externen Flugtagen (Abbildungen 5.62 und 5.64) bzw. 2500 externen Flugtagen (Abbildungen 5.63 und 5.65) ergibt ein dem teilautomatisierten System ähnliches Bild: Die zusätzlichen Flugtage führen zwar zu einer besseren Kostenumlage der Fixkosten, können allerdings auf Grund der geographischen Ausdehnung und des gesamten Missionsumfangs nicht für eine vollständige Auslastung der untersuchten Systeme sorgen und senken die Kosten damit nicht in vollem Umfang.

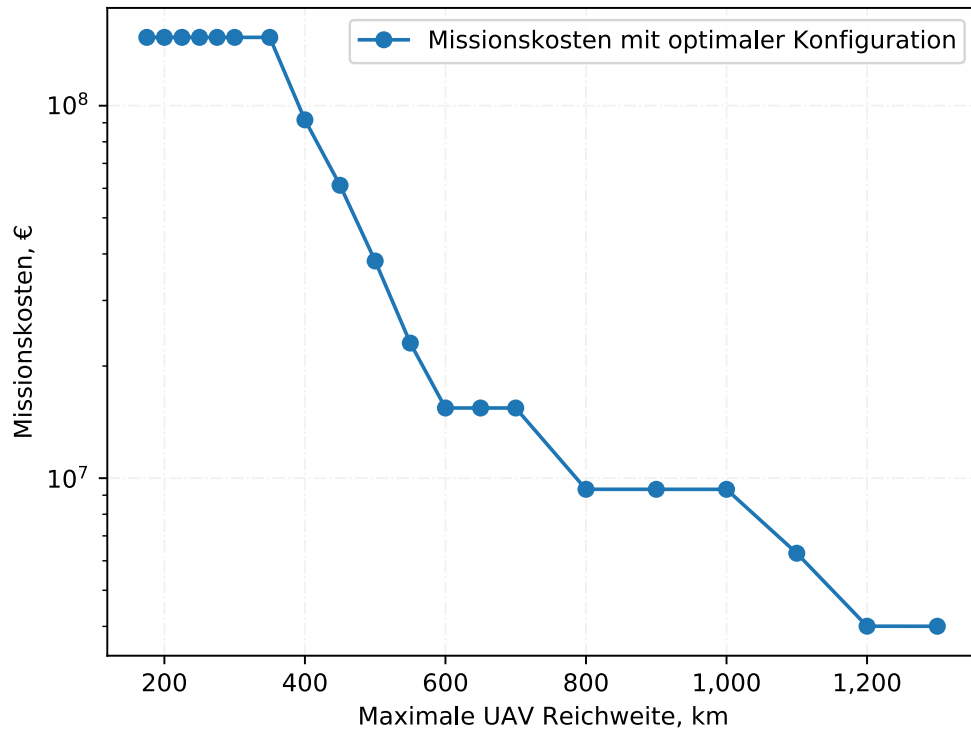


ABB. 5.62: Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

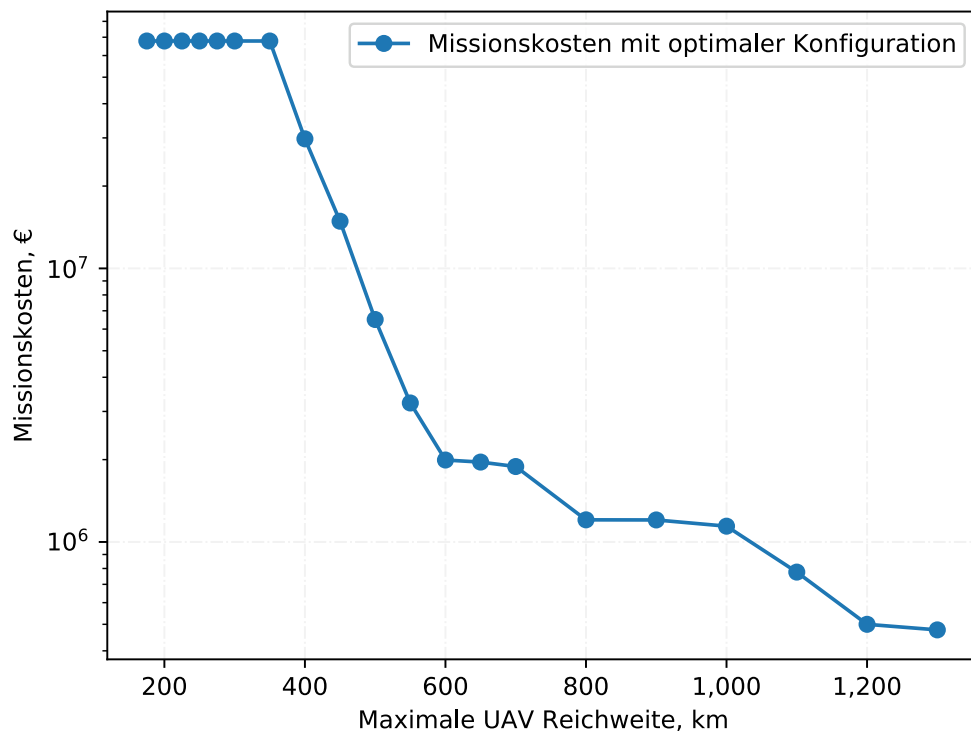


ABB. 5.63: Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

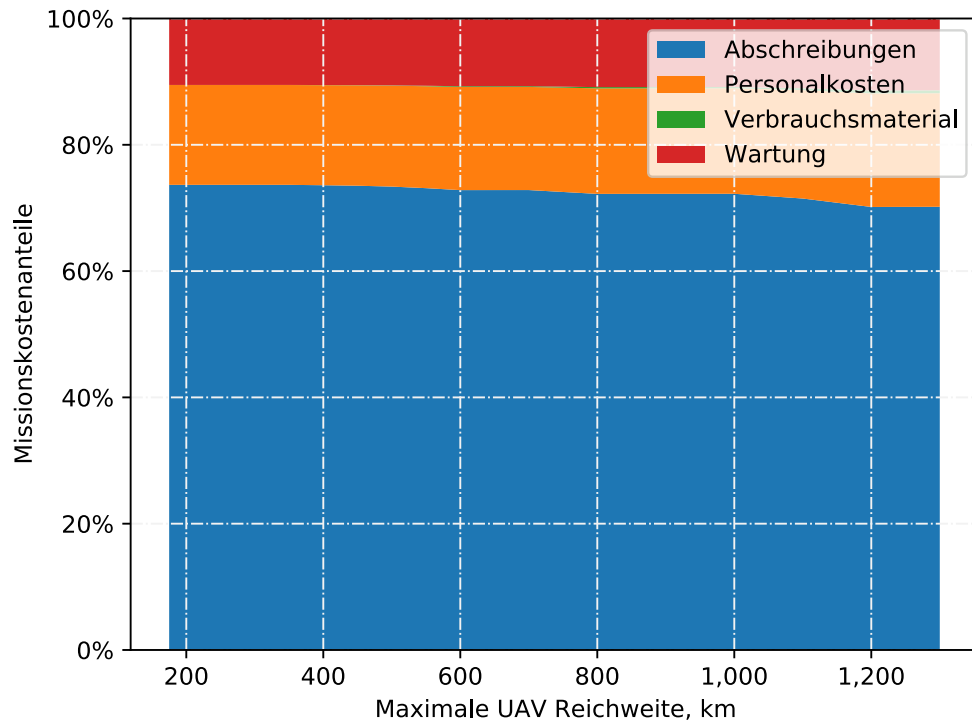


ABB. 5.64: Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen

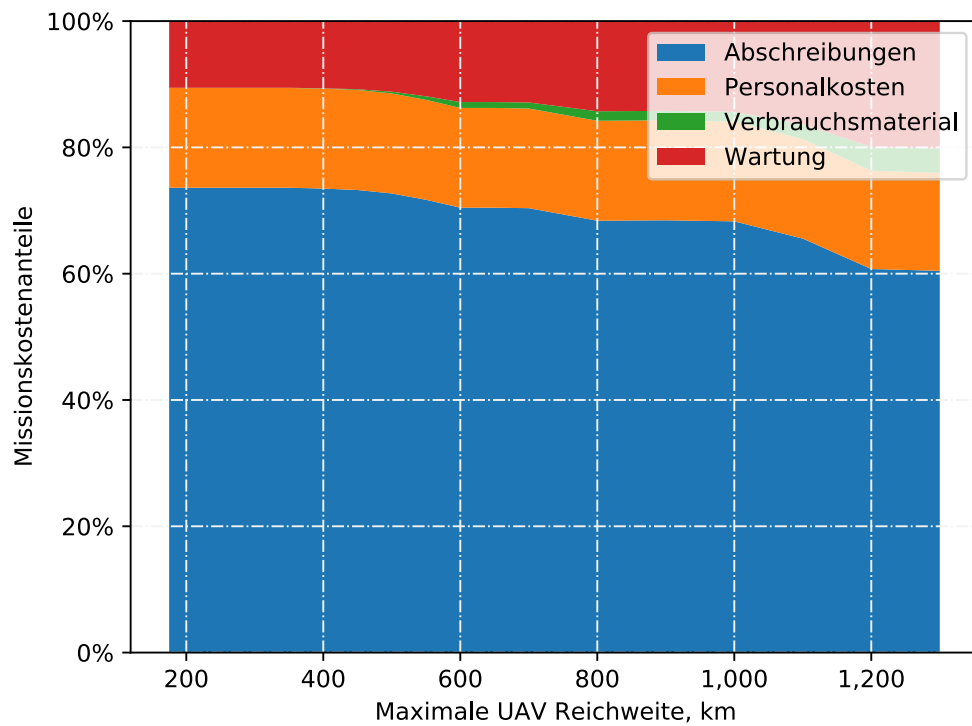


ABB. 5.65: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen

5.2.2.3 VTOL UAV - hochautomatisierter Betrieb

Auch beim US Gasfernleitungssystem zeigt das hochautomatisierte VTOL UAV System deutliche Kostenvorteile insbesondere in den Bereichen mit geringerer UAV Reichweite. Abbildungen 5.66 und 5.67 verdeutlichen ein Absinken der Missionskosten von ca. 88 Mio. € auf 1,1 Mio. €, was ebenfalls einem Unterschied um den Faktor 80 entspricht - auch hier bei geringer untersuchter Reichweiten Bandbreite auf Grund einer größeren erforderlichen Mindestreichweite zur Abdeckung des Missionsgebietes. Beim deutschen Bahnnetz hingegen wies das VTOL System mit einer Kostenspreizung um den Faktor 34 eine deutlich geringere Kostenspreizung gegenüber der Reichweite auf.

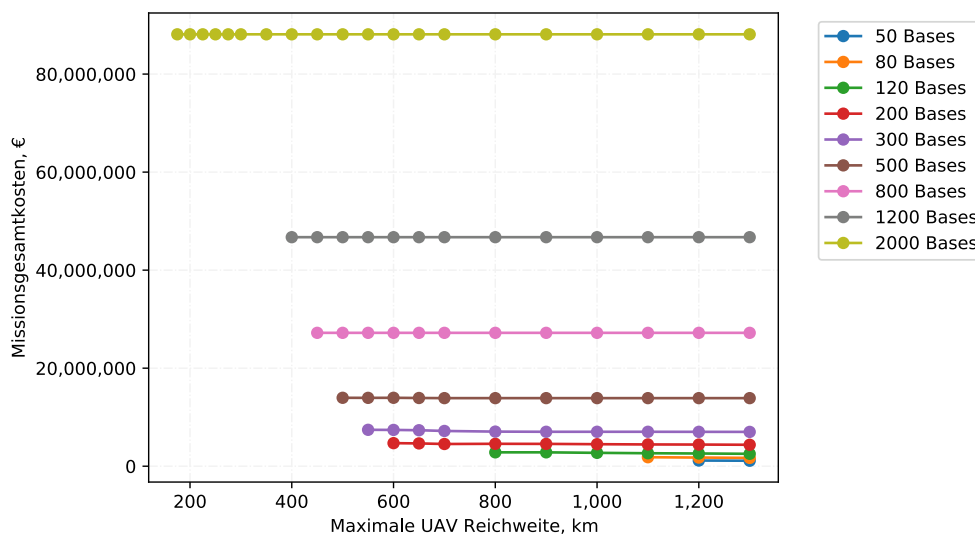


ABB. 5.66: Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen

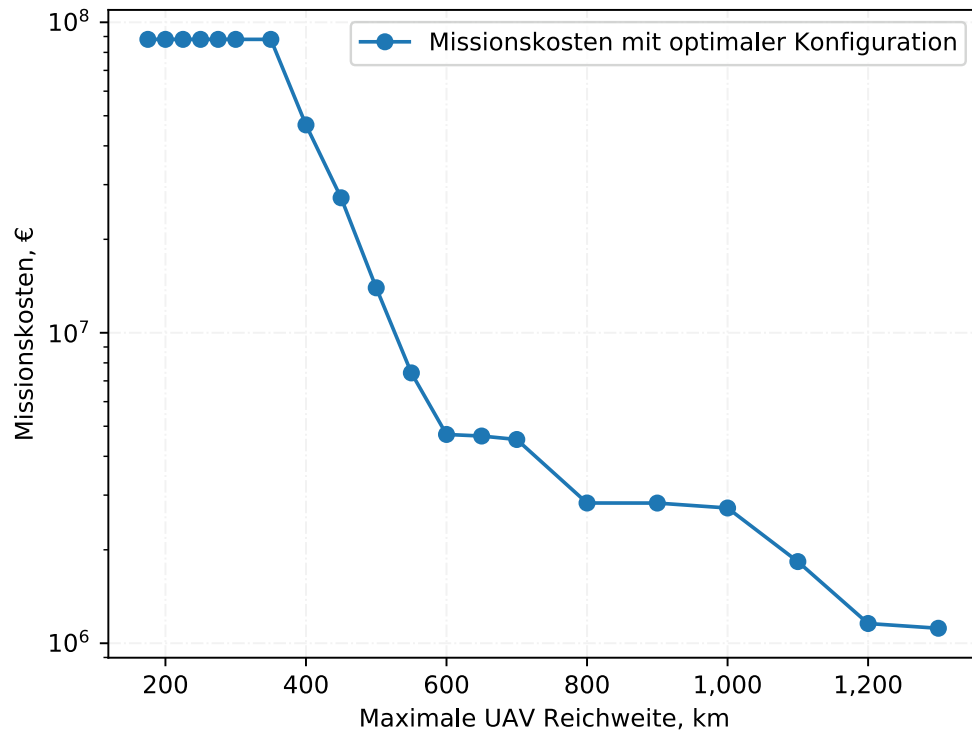


ABB. 5.67: Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration

Ähnlich dem hochautomatisierten System sind auch beim VTOL System die Fixkosten für Abschreibungen und Personal dominierend. Wartungskosten und Abschreibungen (Abbildungen 5.68 und 5.69) fallen jedoch auf Grund des Systemkonzeptes etwas geringer aus als beim Starrflügelssystem.

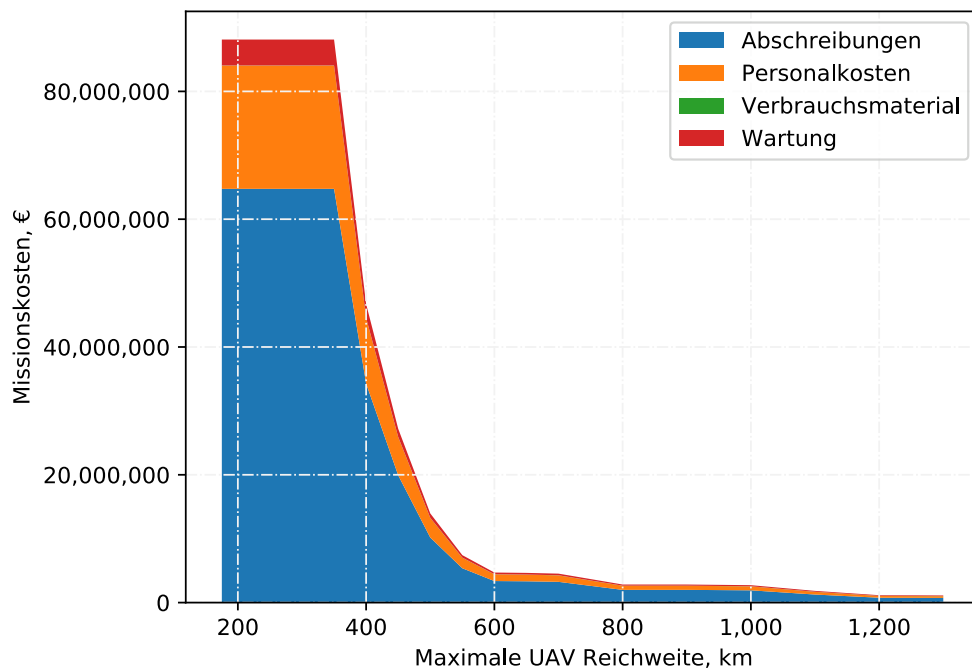


ABB. 5.68: Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration

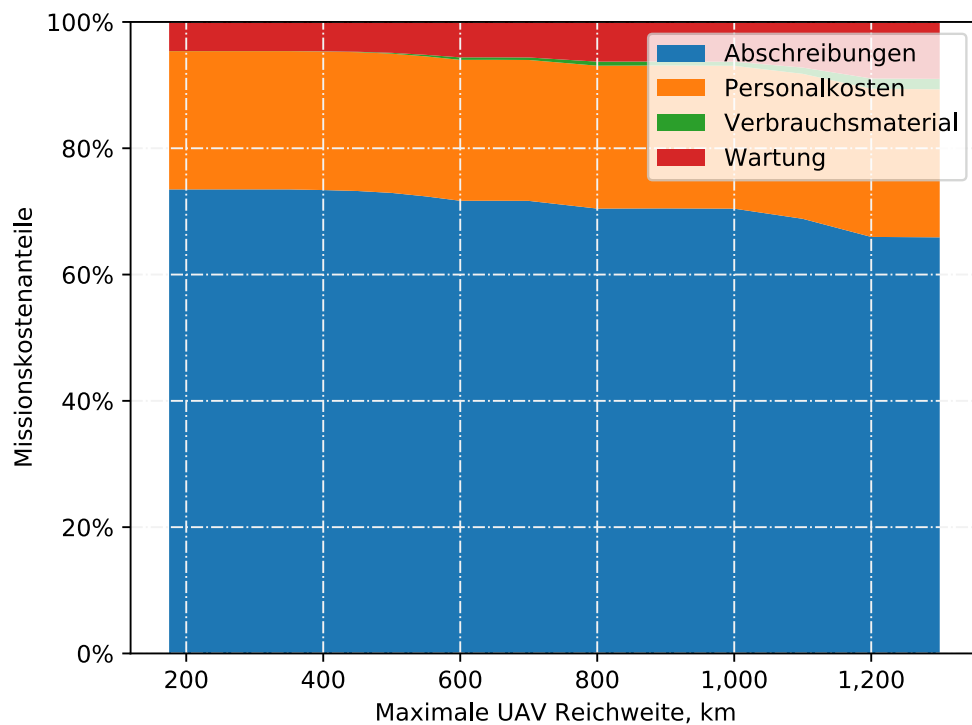


ABB. 5.69: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration

Wenngleich Abbildungen 5.70 und 5.72 für 0 externe Flugtage bzw. Abbildungen 5.71 und 5.73 für 2500 externen Flugtage einen erheblichen Einfluss einer verbesserten Auslastung auf die Gesamtkosten zeigen, wird auch hier deutlich, dass auf

Grund der größeren und weiter verteilten Infrastruktur die zuvor hinzugefügten 2500 Flugtage einen deutlich geringeren Einfluss zu Senkung der Gesamtmissionskosten haben als dies beim deutschen Bahnnetz der Fall war.

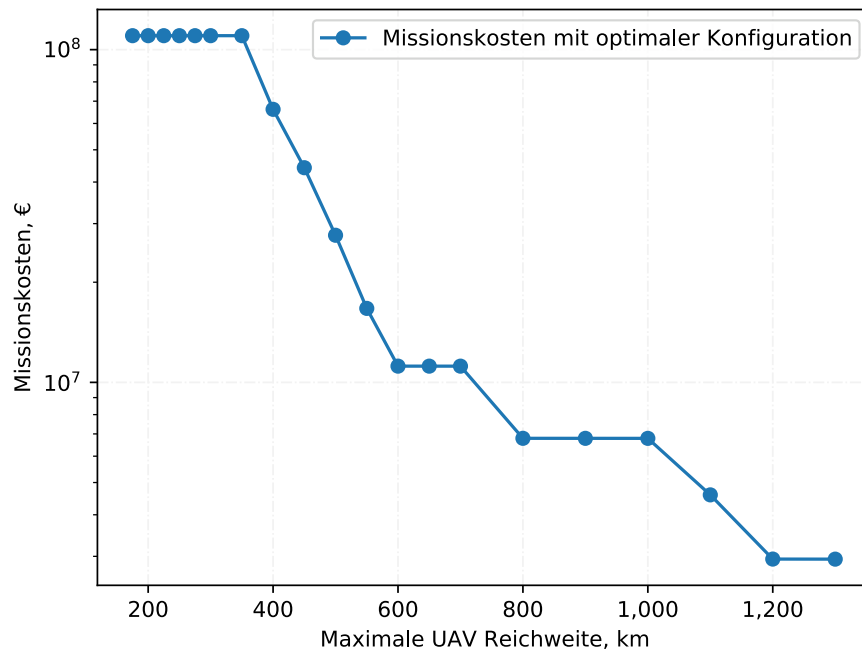


ABB. 5.70: Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

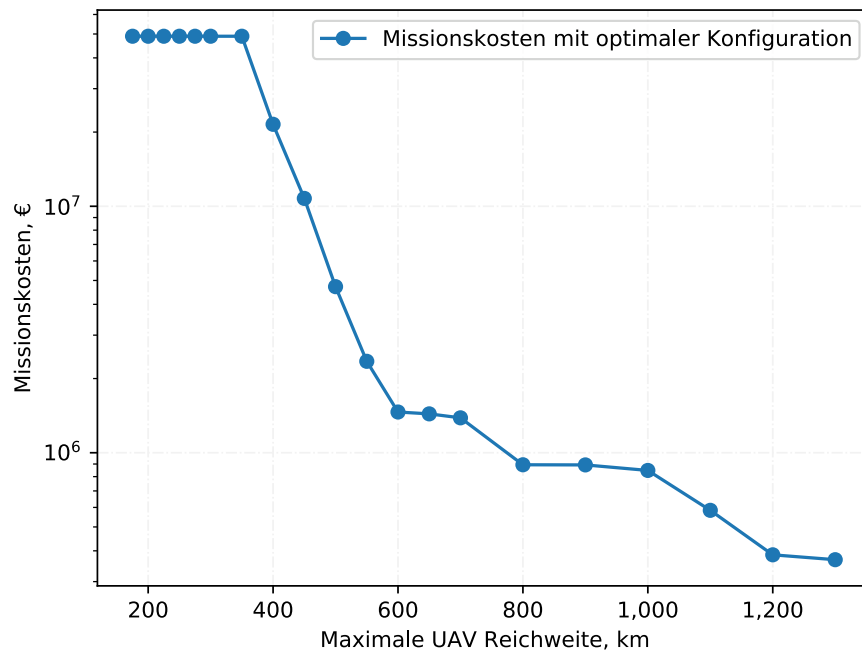


ABB. 5.71: Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen

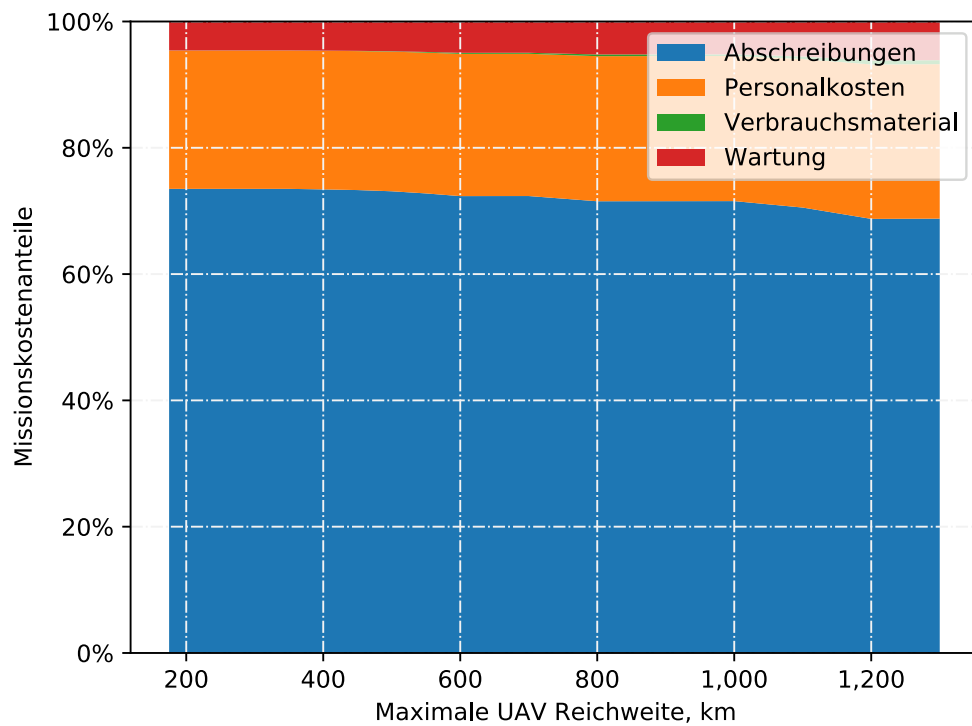


ABB. 5.72: Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen

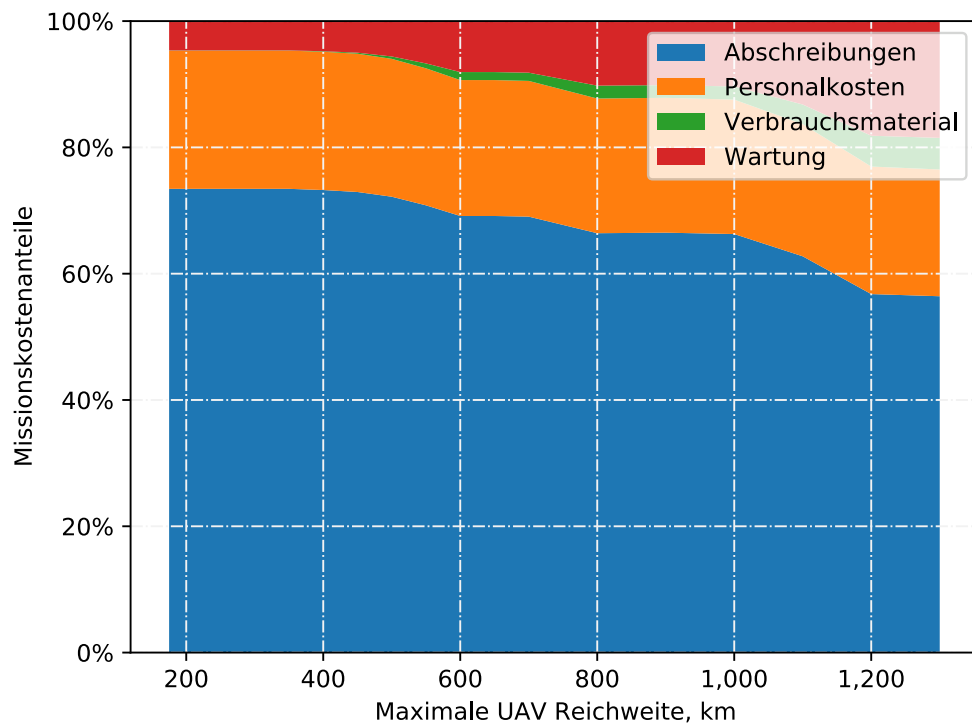


ABB. 5.73: Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen

5.2.2.4 Satellit

Der hier verwendete Datensatz des US Gaspipeline Fernleitungsnetzes des Festlandes (ohne Alaska) umfasst insgesamt 191.600 km an Pipelinelänge.

Wendet man das vereinfachte Kostenmodell für Satellitendaten auf die hier genutzte Pipelineinfrastruktur an und veranschlagt je Streckenkilometer 10 € für neu beauftragte Satellitendaten, so kommt man auf Gesamtkosten von ca. 1,9 Mio €.

Kann ohne eine Echtzeitanforderung auf datenbankbasierte Archivdaten zurückgegriffen werden, so sinken diese Kosten auf 191.000 €.

5.2.3 Vergleichende Systembewertung

Stellt man für den Anwendungsfall der US Pipelineinfrastruktur die Systemkonzepte in den direkten Kostenvergleich, sind deutliche Unterschiede gegenüber dem deutschen Bahnnetz mit seiner deutlich dichteren Infrastrukturgeographie erkennbar.

Niedrige Auslastung Während beim deutschen Bahnnetz die Kostenparität zu neu beauftragten Satellitendaten selbst bei niedriger Auslastung ohne weitere Aufträge zur Fixkostenumlage bei schließlich ca. 700 km (VTOL), 900 km (Starrflügel hochautomatisiert) bzw. 1000 km (Starrflügel teilautomatisiert) erreicht werden konnte, verbleiben die Missionskosten für das Pipelinenetz selbst bei sehr großer verfügbarer Reichweite oberhalb derer von Satelliten (Abbildung 5.74). Die Streckenkilometerkosten sinken je nach luftgestütztem Systemkonzept von 600 €/km bis 1500 €/km auf maximal 18 €/km bis 30 €/km und verbleibend so oberhalb derer von Satelliten (Abbildung 5.75).

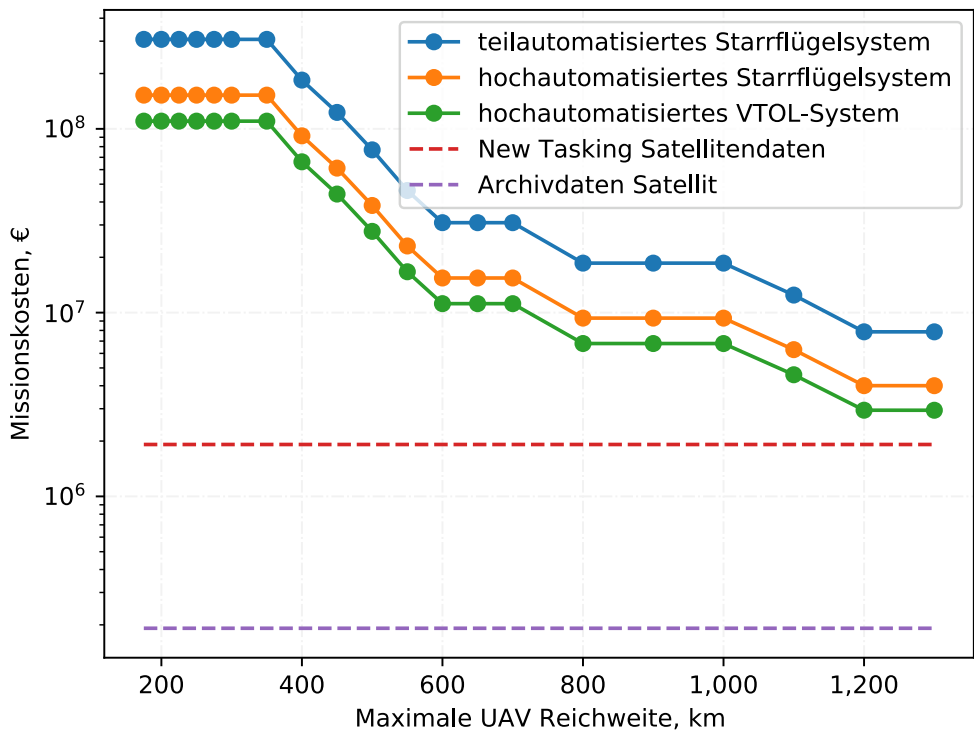


ABB. 5.74: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen

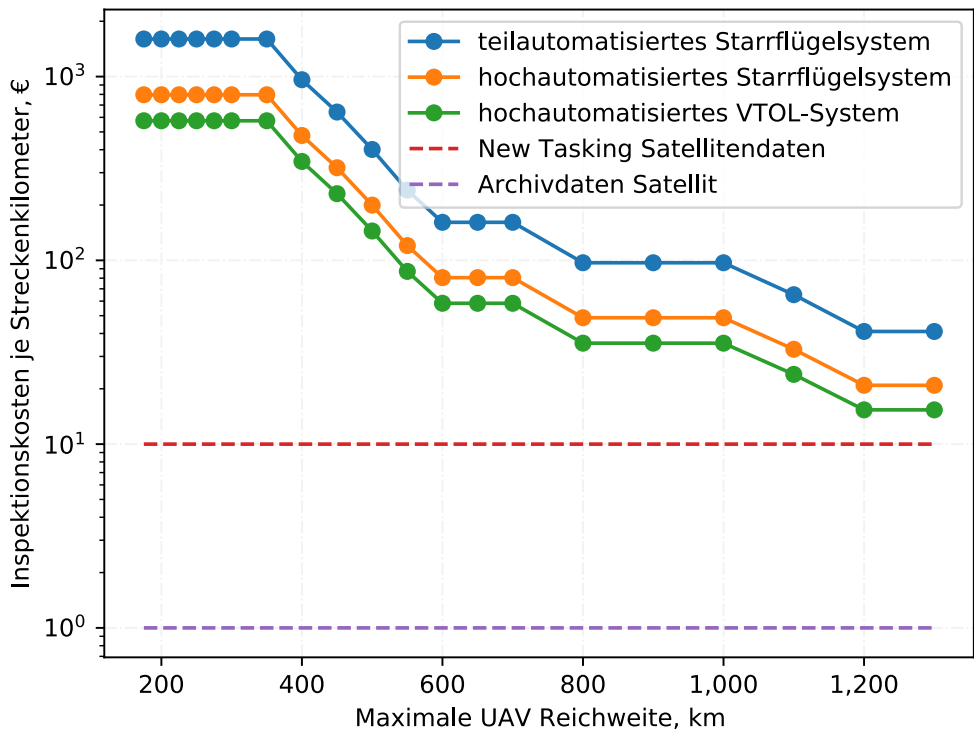


ABB. 5.75: Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen

Mittlere Auslastung Bei einer mittleren Auslastung von 500 zusätzlichen Flugtagen (Abbildungen 5.76 und 5.77), kann für die hochautomatisierten Starrflügel und VTOL Drohnen die Kostenparität mit neu beauftragten Satellitendaten im Reichweitenbereich von 1100 km bis 1200 km erreicht werden.

Die Streckenkilometerkosten fallen für die hochautomatisierten Systemkonzepte auf 6 €/km bis 8 €/km. Teilautomatisierte Starrflügelsysteme bleiben Befliegungskosten von etwa 16 €/km deutlich teurer als Satellitendaten.

Beim deutschen Bahnnetz konnten für dieses Auslastungsniveau bereits die Kostengrößenordnung von 1 €/km erreicht werden, was es den luftgestützten Systemen ermöglichen sollte, hinsichtlich Kosten mit Satellitenarchivbildern zu konkurrieren. Dies ist beim US Pipeline System eindeutig nicht der Fall.

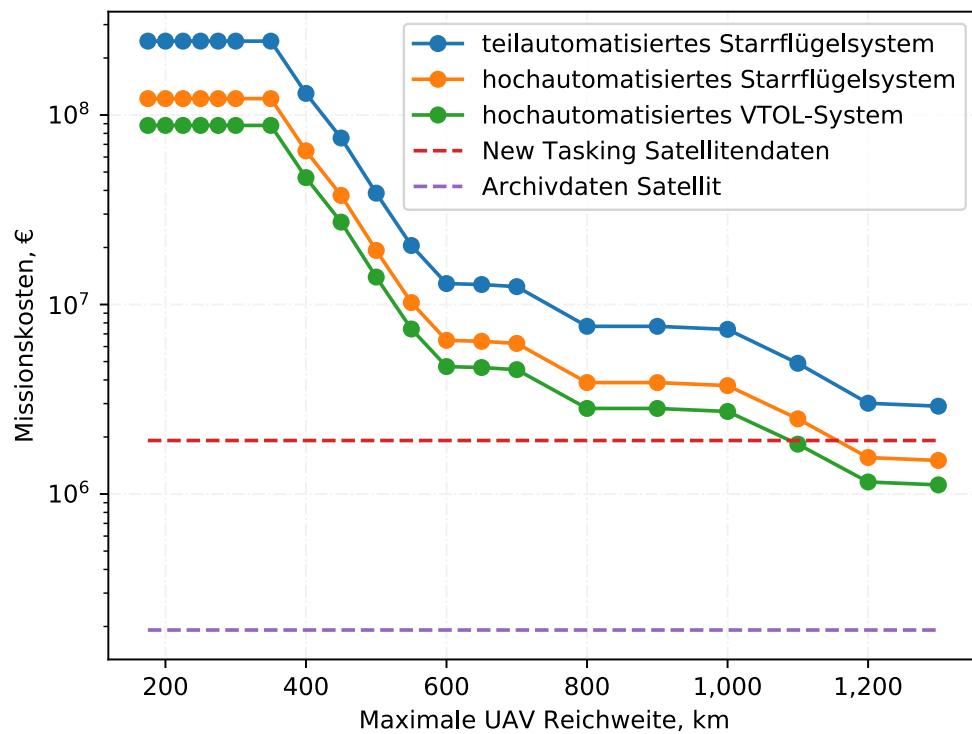


ABB. 5.76: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen

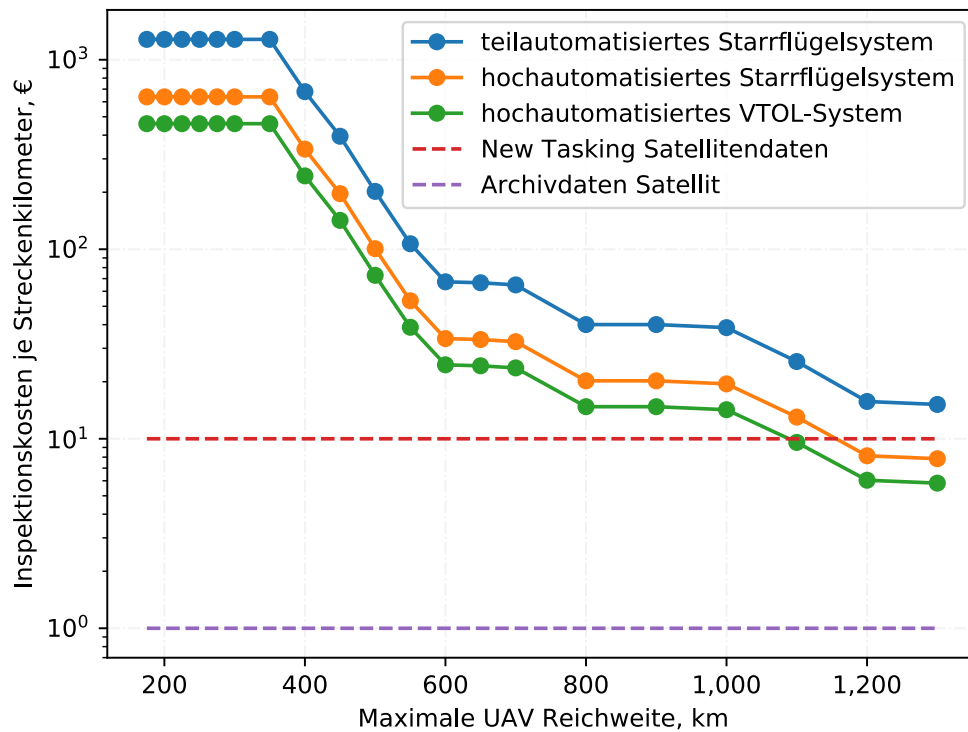


ABB. 5.77: Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen

Hohe Auslastung Im Szenario mit der höchsten untersuchten Auslastung (Abbildungen 5.76 und 5.77) können schließlich alle luftgestützten Systemkonzepte das Kostenniveau von neu beauftragten Satellitendaten unterbieten. Im Gegensatz zum deutschen Bahnnetz gelingt es jedoch unabhängig von der Reichweite nicht, das Kostenniveau von Satellitenarchivbildern zu erreichen oder zu gar zu unterbieten.

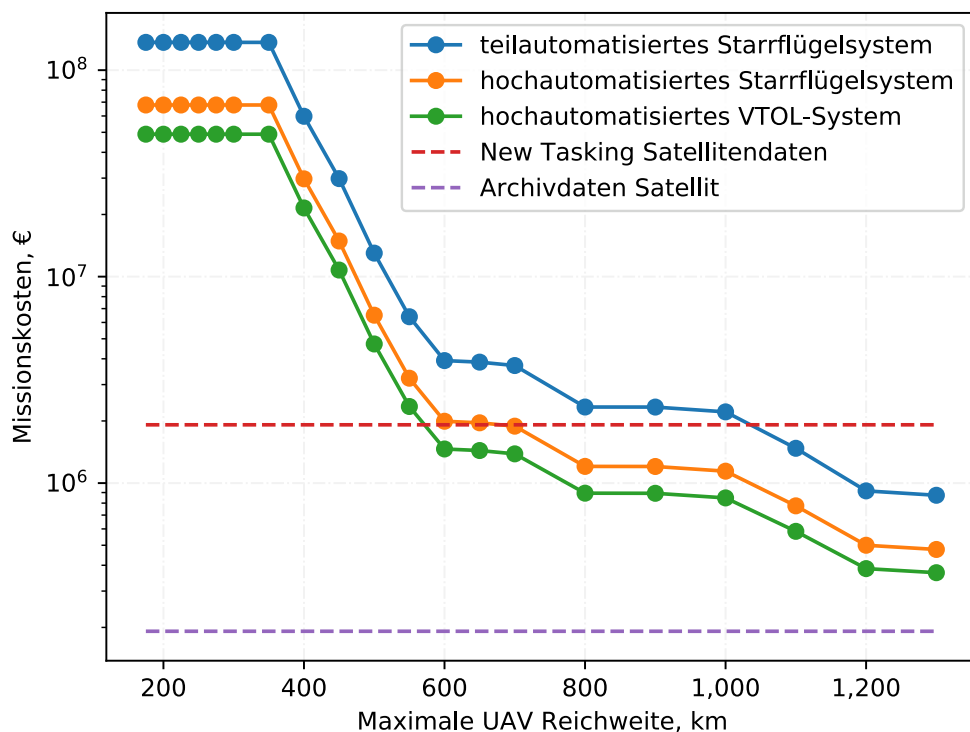


ABB. 5.78: Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen

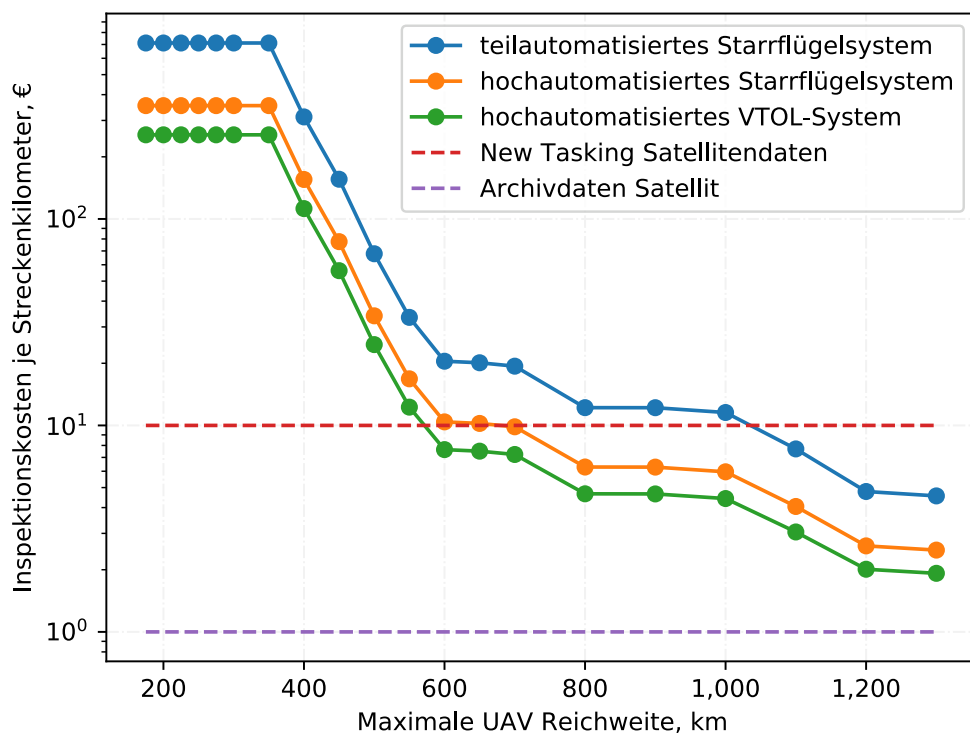


ABB. 5.79: Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen

Wert inkrementeller Reichweite In Abbildung 5.80 ist der Mehrwert zusätzlicher Reichweite als Missionskosteneinsparung je Kilometer Reichweite abgebildet. Auffallend hierbei ist, dass im Bereich von 200 km Reichweite, welcher beim Anwendungsfall der deutschen Bahn entscheidend war, hier so gut wie kein Mehrwert durch zusätzliche Reichweite entsteht, allerdings im Bereich der wirtschaftlichen "Mindestreichweite" um 400 km sehr hohe Wertsteigerungen zu beobachten sind. Auch hier sei jedoch darauf hingewiesen, dass keine kontinuierliche Variation der Basenanzahlen untersucht werden konnte und deshalb bei 400 km Reichweite ein diskontinuierlicher Wechsel der 2000 Basen Konfiguration auf den nächsten Schritt mit nur noch 1200 Basen möglich wird. Es kann also davon ausgegangen werden, dass durch Zwischenschritte auch unterhalb von 400 km Reichweite Mehrwert durch Reichweitenvariation entstünde. Dies ist jedoch nur von begrenzter praktischer Relevanz, da dieser Reichweitenbereich ohnehin prohibitiv hohe Gesamtmissionskosten für den Einsatz von UAV mit sich brächte.

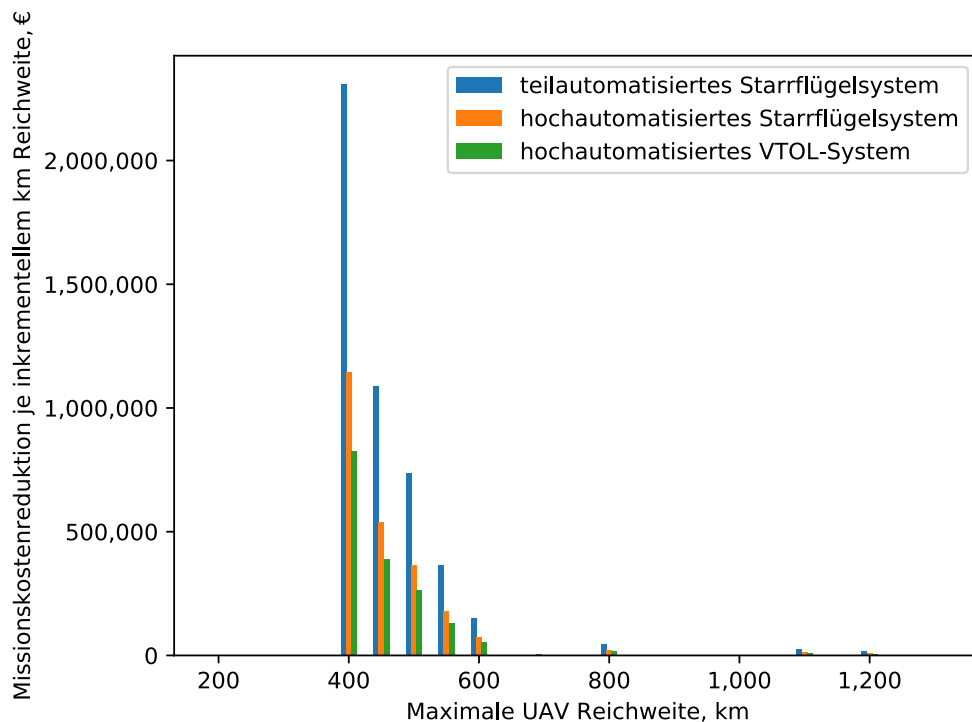


ABB. 5.80: Missionskosteneinsparungen je km zusätzlicher UAV Reichweite

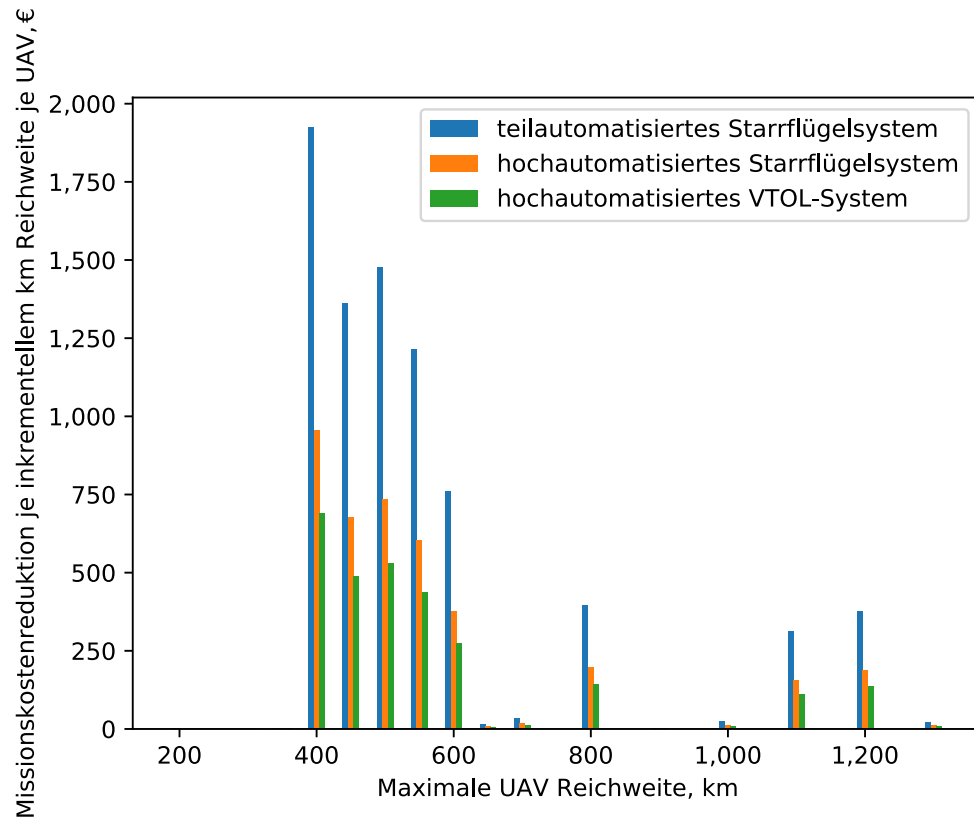


ABB. 5.81: Missionskosteneinsparungen je individuellem UAV je km zusätzlicher UAV Reichweite

Dies ist ebenso reflektiert in der Betrachtung der Kosteneinsparung je Kilometer bezogen auf ein einzelnes UAV (Abbildung 5.81), welche im Bereich zwischen 400 km und 600 km am höchsten sind. Gleichwohl sind anders als beim deutschen Bahnnetz auch in höheren Reichweitenbereichen noch erhebliche Kosteneinsparungen durch vergrößerte Vehikelreichweite erzielbar.

Auffällig ist zudem, dass der Mehrwert inkrementeller Reichweite bei teilautomatisierten Starrflügelsystemen mit Abstand am höchsten ist, in einem Abstand gefolgt vom hochautomatisierten Starrflügelgesamtsystem und schließlich dem VTOL System. Dies kann erklärt werden durch die höheren Fixkostenbasis des Ersteren, welche besonders von einer Reduktion der Basenanzahlen zur Kostensenkung profitiert.

Als Gesamtresümee bleibt festzuhalten, dass hochautomatisierte VTOL Systeme den teureren Starrflügelsystemen hinsichtlich der Gesamtmissionskosten überlegen sind, sofern sie eine ausreichend große Reichweite realisieren können.

6. Diskussion alternativer Fernerkundungsansätze und deren Rolle in Energiesystemen

Die in Kapitel 5 ausgeführten Ergebnisse werfen die Frage auf, welche Rückschlüsse für die Konzeptionierung und den Betrieb von luftgestützten Inspektionsmethoden für ausgedehnte Infrastrukturen insgesamt gezogen werden können:

- Wie müssen UAV Gesamtsysteme ausgelegt und positioniert werden, um sich kostenoptimalen Auslegungspunkten möglichst anzunähern und wie hängt dies von Eigenschaften der betrachteten Infrastruktur ab?
- Welche Bedeutung hat Reichweite in diesem Kontext? Welchen Mehrwert generiert Reichweite und welche Rückschlüsse für eine bestimmte Anwendung hinsichtlich gesteigerter Zahlungsbereitschaft durch Anwender können Drohnenhersteller daraus ziehen?
- Lässt sich eine Tendenz erkennen, welches UAV Konzept (Starrflügel mit oder ohne Start-/Landesystem oder VTOL) die geringsten Gesamtkosten anbietet? Hängt die relative Wettbewerbsfähigkeit von der Art der Infrastruktur ab?
- Können UAVs über Kostenführerschaft oder Qualität mit Satelliten konkurrieren?
- Welche Weiteren nicht im Detail untersuchten Technologiealternativen würden grundsätzlich für diese Art von Inspektionsaufgaben in Frage kommen?
- Welchen Einschränkungen und Limitationen unterliegt der gewählte Forschungsansatz?

Im Folgenden werden diese Fragestellungen an Hand der erzielten Ergebnisse diskutiert und soweit als möglich beantwortet.

6.1 Wert von Reichweitensteigerung bei UAVs

Der Forschungsansatz, im Kostenmodell zunächst von der Reichweite unabhängigen UAV-Beschaffungskosten auszugehen ermöglicht es, den Anwender-Mehrwert zusätzlicher Reichweite unverfälscht herauszuarbeiten. Hierzu ist es notwendig, zunächst die Missionskosteneinsparungen zu berechnen ohne bereits einen möglichen Einfluss der Reichweitespezifikationen auf den Verkaufspreis des UAVs einzubeziehen. Auf diese Weise kann für den UAV-Hersteller ermittelt werden, in welcher Höhe sein Kunde oder Anwender Kostenvorteile durch eine gesteigerte Reichweite erzielen kann und in welchem Maße er damit eine gesteigerte Zahlungsbereitschaft gegenüber verbesserten Spezifikationen zeigen würde. Dies wiederum ist eine wichtige Information für die Preisgestaltung des Luftfahrzeuges als Ergebnis (nicht jedoch Eingangsvariable) der Reichweite.

Weiterhin kann die Zahlungsbereitschaft für eine Spezifikationsverbesserung und aus ihr abgeleitete Preisgestaltung wiederum einen Beitrag zur Entscheidungsgrundlage leisten, um Designentscheidungen bei der Entwicklung der Luftfahrzeuge zu treffen und zu beurteilen, ob mögliche erhöhte direkte Herstellkosten betriebswirtschaftlich rechtfertigbar sind. Dies ist insofern relevant, als dass Herstellkostensteigerungen durch einen reichweitenstärkeren Luftfahrzeugentwurf in hohem Maße sprunghaft auftreten und eine Abwägung essentiell ist, ob dieser Kostensprung im gerade betrachteten Reichweitenbereich gerechtfertigt ist oder nicht.¹

Die im Kapitel 5 gezeigten Ergebnisse verdeutlichen sehr gut, dass der Mehrwert von zusätzlicher Reichweite sehr unterschiedlich ausfallen kann. Anhand der beiden sehr unterschiedlich ausgeprägten Infrastrukturen konnte gezeigt werden, dass der Wert von Reichweitensteigerungen in hohem Maße vom Reichweitenbereich abhängig ist. Welche Reichweitenbereiche dabei besonders sensiblen Einfluss veränderter Reichweite auf die Missionskosten aufweisen, hängt zudem von der Geometrie und Größe der betrachteten Infrastruktur ab. Während das deutsche Bahnnetz eine besonders hohe Sensitivität im Reichweitenbereich von 200 km bis 300 km zeigte, liegt der sensitive Bereich beim US-Pipelinennetz mit 400 km bis 500 km deutlich höher. Der Wert zusätzlicher Reichweite ist zudem bei beiden Anwendungsfällen beim teilautomatisierten Starrflügelsystem am höchsten, gefolgt vom hochautomatisierten Starrflügelsystem und dem VTOL-System.

¹So können innerhalb von Obergrenzen der UAV-Maximalmasse Reichweitensteigerungen konstruktiv sehr leicht durch eine Vergrößerung von Tanks und/oder Flügeln und Motoren erreicht werden, was nur marginal vergrößerte Herstellkosten verursacht, insbesondere wenn man diese ins Verhältnis zu den indirekten Kosten des Unternehmens und dem dadurch erforderlichen Mindestverkaufspreis setzt. Wird jedoch beispielsweise eine solche Massengrenze erreicht, wird möglicherweise zur weiteren Reichweitensteigerung ein Sprung auf eine andere Antriebstechnologie notwendig, welche möglicherweise mit erheblichen direkten Kostensteigerungen verbunden ist.

Es kann zudem geschlussfolgert werden, dass die Reichweitenbereiche, welche diesen sehr hohen Grenznutzen aufweisen, gleichfalls die erforderliche Mindestreichweite in Bezug auf eine bestimmte Infrastruktur darstellen, um überhaupt in den Bereich eines wirtschaftlichen Betriebs solcher Gesamtsysteme zu kommen.

6.2 UAV Systemkonzepte im Vergleich

Eine der Forschungsfragen bestand darin, eine Methodik zu entwickeln, mit der sich bewerten lässt, welche der grundlegenden Systemkonzepte die beste wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit aufweist. Mit der vorgelegten zweistufigen Methodik konnte ein hierfür geeigneter Bewertungsrahmen geschaffen werden, welcher zugleich geeignet ist, sich dem hochdynamischen Innovationsumfeld des UAV Marktes anzupassen: Anders als in der Verkehrsluftfahrt werden im Drohnenbereich von einer Vielzahl an Startups fast täglich neue neue Produkte entwickelt und auf den Markt gebracht. Diese unterscheiden sich sowohl im Preis wie auch den Spezifikationen (insbesondere Nutzlast, Reichweite und Cruise Geschwindigkeit). Ein einfacher empirisch-statistischer Zusammenhang zwischen einer einzelnen Eigenschaft wie der Reichweite und dem Verkaufspreis ließe sich nur sinnvoll mit potenziell hoher Signifikanz ermitteln, würde sich der Markt in einem relativ statischen Technologiezustand befinden, in dem Innovation nur langsam voranschreitet und sich am Markt ein Wettbewerbsgleichgewicht etablieren kann, in welchem sich Marktpreise den tatsächlichen Vollkosten der UAV-Hersteller annähern und zudem die Datenbasis hinreichend groß und auf dem gleichen Technologieniveau ist. Eine weitere Voraussetzung für ein solches methodisches Vorgehen wäre eine Einheitspreisstrategie für die angebotenen Drohnenmodelle anstelle der im Markt häufig praktizierten stark kundenindividuellen und vertraulichen Preisgestaltung.

Um für den Anwender eine nachhaltige Nutzbarkeit des Bewertungsmodells zu gewährleisten, wurde daher mit Hilfe realistischer² Anschaffungskosten wie oben beschrieben der Mehrwert verbesserter Reichweitespezifikationen innerhalb eines Systemkonzeptes herausgearbeitet, was es dem Anwender ermöglicht, zur Verfügung stehende Angebote intuitiver miteinander zu vergleichen. Für eine detaillierte Vergleichsrechnung zwischen zwei spezifischen UAV Konzepten mit individuellen Preisangeboten, kann eine Vergleichsrechnung mit individuellen Eingangsparametern und Preisen der spezifischen vorliegenden Angebote erstellt werden.

Dies vorausgeschickt, lassen sich mit den generischen Preisdaten, welche auf realistischen Annahmen basieren, dennoch deutliche Trends hinsichtlich der Kostenstruktur und der relativen Vorteilhaftigkeit zwischen Systemkonzepten ableiten. So zeigten die hochautomatisierten VTOL Systeme bei den angenommenen Investitionsausgaben bei beiden Anwendungsfällen und über alle Reichweiten hinweg deutliche Kostenvorteile gegenüber den Starrflügelsystemen. Insbesondere die nur

²durch Experteninterviews validiert

teilautomatisierten Starrflügelsysteme mit erhöhtem Personaleinsatz in den Betriebsbasen können gegenüber den hochautomatisierten Systemvarianten als kaum konkurrenzfähig betrachtet werden. Lediglich das hochautomatisierte Starrflügelsystem mit Start-/Landeautomat kann bei sehr hohen Reichweiten in die Nähe der Kostenbasis von VTOL Systemen kommen, wenngleich diese bei den angenommenen Investitionsausgaben und bei gleicher Reichweite nicht unterbieten. Für den Fall, dass ein VTOL System konstruktiv bedingt erheblich unter den Reichweitenfähigkeiten von hochautomatisierten (fahrwerklosen) Starrflügelsystemen zurückbleiben würde und/oder deutlich höhere Investitionsausgaben als letzteres aufweisen sollte, wäre es denkbar, dass hiermit im Einzelfall niedrigere Gesamtsystemkosten erzielbar sein können. Dies dürfte jedoch eher die Ausnahme darstellen.

Darüber hinaus sind für die Abwägung zwischen Systemkonzepten für den praktisch-operativen Einsatz weitere Erwägungsgründe zu berücksichtigen. So besitzen VTOL Konzepte die Fähigkeit sich einer im Vorbeiflug identifizierten Position von Interesse in der Folge im Schwebeflug zu nähern und somit weitere Detailaufnahmen aus nächster Nähe und mit gegebenenfalls deutlich längerer Belichtungszeit anzufertigen. Dies ist Starrflügelsystemen nicht möglich, da sie aufgrund der minimal erforderlichen Fluggeschwindigkeit deutlich größere Abstände einhalten müssen und eine erheblich größere Bewegungsunschärfe bei längeren Belichtungszeiten aufweisen.

Abschließend ist für die drohnenbasierten Fernerkundungssysteme festzustellen, dass der erhebliche technische und personelle Aufwand der initialen Abdeckung derart weitläufiger Infrastrukturen zu einem hohen Fixkostenanteil führt. Dadurch wird die Auslastung der Systeme, welche je nach verfügbarer Reichweite eine unterschiedliche Minimalkapazität aufweisen, ein entscheidender Faktor hinsichtlich der erzielbaren Missionskosten. Eine möglichst hohe Auslastung durch regelmäßige Befliegungen oder anderweitige Aufträge ist deshalb entscheidend zur Senkung der Kosten auf ein wettbewerbsfähiges Niveau.

6.3 Vergleich zu Satellitensystemen

Die Kostenführerschaft im Vergleich zu Satellitendaten hängt von mehreren Faktoren ab und lässt sich nicht pauschal beantworten.

Entscheidend für die preisliche Vorteilhaftigkeit drohnen- oder satellitenbasierter Lösungen ist die Geometrie oder Dichte der betrachteten Infrastruktur. Dichte wird hierbei als ein Maß von produktiven Leitungskilometern je Quadratkilometer Missionsgebiet aufgefasst und bestimmt in erheblichem Maße die Mindestanzahl an Betriebsbasen und damit Betriebskapital sowie Personalkosten je abgeflogenen Leitungskilometer. Die beiden untersuchten Beispiele des deutschen Bahnnetzes

und des US Pipelinenetzes unterscheiden sich in dieser Hinsicht deutlich voneinander. Während das deutsche Schienennetz kompakt genug ist, um bei ausreichender Reichweite eine effiziente Befliegung zu realisieren und die Kosten für neu beauftragte und teilweise sogar Satellitenbestandsdaten zu unterbieten, gelingt dies beim US Pipelinenetzwerk nicht in gleichem Maße. Bei letzterem kann selbst bei hohem Auftragsvolumen und hohen Reichweiten das Kostenniveau von Satellitenbestandsdaten nicht erreicht werden, wenngleich das Kostenniveau von Satelliteneubeauftragung unterboten werden kann. Insofern kommt der Notwendigkeit oder Nicht-Notwendigkeit von Aktualität der Daten eine besondere Bedeutung für die Missionsbeurteilung zu.

Die aufgezeigten Kostenniveaus implizieren allerdings einen bereits hochskalierten Markt für Drohnenbefliegungsdaten, da gute Wirtschaftlichkeiten erst hochskaliert durch eine hohe Auslastung des Gesamtsystems erreicht werden. Der Vergleich mit dem bestehenden Kostenniveau von Satellitendaten hinkt insofern etwas, da dieses sich auf ein System bezieht, das sich bereits im hochskalierten Zustand befindet und kein anfängliches Risiko durch Ramp-up-Ineffizienzen sowie hinreichendes Auftragsvolumen aufweist. Da die drohnengestützte Datenerfassung somit eine Projektion in die Zukunft ist, sei darauf hingewiesen, dass sich das Kostenniveau im Satellitenbereich durch weitere Innovationen zukünftig noch weiter verringern kann.

Ein wichtiger Unterschied und Vorteil drohnengestützter Datenerhebung besteht allerdings in der erzielbaren Qualität der Daten. In erster Linie bezieht sich dies auf die wesentlich bessere Auflösung, welche durch einen Sensor aus geringerer Distanz zu erzielen ist. Drohnen sind durchaus in der Lage, optische Daten mit einer Ground Sampling Distance von 1 cm zu erfassen, während kommerzielle Satelliten aktuell auf ca. 30 cm Ground Sampling Distance beschränkt sind. Dieses Limit von 30 cm Auflösung ist jedoch überwiegend ein politisches und kein technisches, da heute US-amerikanische Spionagesatelliten technisch in der Lage sind, Bilder in 7 cm Auflösung zu vermessen. Insofern stellt sich für künftige Entwicklungen durchaus die Frage, ob sich die Grenzen der optisch erzielbaren Auflösung in absehbarer Zeit in einen Bereich verschieben, der für fast jede Inspektionsaufgabe hinreichend genau sein wird.

Wetterabhängige Verfügbarkeit der Datenerfassung ist ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt, der drohnengestützte Erfassung tendenziell bevorzugt, da letztere nicht in gleichem Maße von Wolkenverdeckung betroffen ist und dies einen Vorteil für zeitkritische Echtzeitdaten darstellt. Andererseits sind auch Drohnensysteme durch wetterbedingte Einschränkungen wie beispielsweise stärkere Winde oder Nebel betroffen.

6.4 Einschränkungen und Limitationen des Forschungsansatzes

Der hier gewählte Forschungsansatz ist zwar geeignet, um eine kostenorientierte Bewertung der unterschiedlichen UAV-Konzepte vorzunehmen und eine Indikation für die Größenordnung der daraus resultierenden Befliegungskosten zu liefern. Er erhebt jedoch keinen Anspruch auf finanzielle Exaktheit im Sinne eines unter Realbedingungen validierten Prozesses, dessen Parameter bis ins Detail bekannt und überprüft sind. Vielmehr handelt es sich um eine unter Verwendung von Operations Research-Methoden und Kostenmodellen entwickelte Prognose über die Größenordnung an Kosten, mit der bei der Implementierung zu rechnen wäre. Weiterhin dient der Ansatz dazu, zu identifizieren, was die Kostentreiber innerhalb eines solchen Ansatzes sind und über welche Stellschrauben sich größere Kostenoptimierungen erzielen lassen.

Konkrete Einzelfälle für durchzuführende Inspektionsaufgaben können besondere Anforderungen an die Sensorhardware, wie zum Beispiel besonders hohe Auflösung durch Nahaufnahmen, Echtzeitdatenübertragung oder Sensortypen (Differential Absorption LIDAR, Infrarot) begründen, welche entscheidend sein können für die Auswahl eines konkreten UAVs, welches diese Sensoren tragen und einsetzen kann. Da der Designraum an UAVs hinsichtlich Nutzlast-Reichweitenoptimierung am Markt nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft erschlossen ist, und sich zudem die Technologieniveaus einzelner Anbieter voneinander unterscheiden, ist es für die Missionskonzeptionierung in der Praxis notwendig, eine Einzelfallbetrachtung geeigneter UAVs hinsichtlich deren Kostenparameter und Reichweitenfähigkeiten vorzunehmen, um ein genaueres Bild der Situation zu erhalten. Die hier vorgelegte Parameterstudie kann jedoch als Ausgangspunkt für die Identifikation möglicherweise geeigneter UAV-Systeme dienen. In einem zweiten Schritt kann der Missionsoptimierer und das Kostenmodell verwendet werden, um die zur Auswahl stehenden konkreten Systemoptionen direkt miteinander zu vergleichen.

Ebenso sei vor einer konkreten Implementierung eines UAV-basierten Inspektionsystems angeraten, den konkreten ins Auge gefassten Inspektionsanwendungsfall hinsichtlich der Art der angestrebten zu erfassenden Informationen zunächst prototypisch zu validieren: Zwar können auf theoretischem Wege Abschätzungen über die Identifizierbarkeit bestimmter Infrastrukturfehlerfälle gegeben werden, mit abschließender Sicherheit kann dies jedoch nur durch Realdaten beurteilt werden. Nicht Gegenstand dieser Arbeit war die tatsächliche Datenauswertung an Hand ebensolcher praktischer Beispiele. Beispieldaten von Befliegungen unter Realbedingungen hinsichtlich deren praktischer Nutzbarkeit zu validieren, könnte Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen sein. In einem ersten Schritt sollten Aufnahmen auf manuelle Weise von Inspektionsfachkräften bewertet werden. Um eine weitere Automatisierung des gesamten Prozesses zu ermöglichen, bietet es sich in einem

zweiten Schritt an, die Fehlererkennung mittels künstlicher neuronaler Netze als selbstständige Softwarelösung zu implementieren. Dies erfordert jedoch für jeden Fehlerfall und Infrastruktur ausreichende Trainingsdaten, welche in Kooperation mit Infrastrukturbetreibern gesammelt werden müssten.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene zur Verfügung stehende Fernerkundungsmethoden vorgestellt und deren technisch-physikalische Grundlagen erläutert (Kapitel 2), um deren Funktionsprinzipien im Folgekapitel auf konkrete luft- oder raumfahrtgestützte Fernerkundungsplattformen für bestimmte Infrastrukturen anzuwenden. Dabei wurde insbesondere deren Anwendung in drohnen- und satellitengestützten Trägerplattformen beschrieben. Weiterhin wurde dargestellt, wie in Frage kommende Zielinfrastrukturen beschaffen sind und welche Anforderungen diese an Inspektionsaufgaben stellen (Kapitel 3).

In Kapitel 4 wurde eine modellbasierte Methodik entwickelt, mit der Drohnensamtsysteme bestehend aus mehreren Startbasen und UAVs und unterschiedlicher Reichweitenspezifikationen zur Abdeckung eines Infrastrukturzielgebietes einander gegenübergestellt und verglichen werden können. Hierzu war es notwendig, eine unter Rechenzeitrandbedingungen funktionsfähige Missionssimulation einer Vielzahl an Missionsinstanzen auf einer weitläufigen Infrastruktur zu entwickeln. Die Vielzahl an generierten Missionen konnte anschließend in einem Kostenmodell weiterverarbeitet werden, mit Hilfe dessen nicht nur unterschiedliche Reichweitenfähigkeiten, sondern auch unterschiedliche UAV-Konzepte hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Tragfähigkeit verglichen werden konnten. Gegenübergestellt wurden hierbei konventionell horizontal startende Starrflügel-UAV mit Betriebspersonal vor Ort, Starrflügel-UAV in Verbindung mit einem automatisierten Start-/Landesystem sowie VTOL-UAV inklusive einer automatisierten Betriebsbasis sowie eine alternative Fernerkundung mittels Satellit.

Angewendet wurde die entwickelte Methodik in Kapitel 5 auf zwei geographisch unterschiedlich geprägte Beispielinfrastrukturen. Zum einen das vergleichsweise dichte, aber geographisch begrenzte deutsche Bahnnetz und zum anderen auf das wesentlich weitläufigere und im Vergleich spärlichere Erdgasfernleitungssystem der Vereinigten Staaten. Es konnte gezeigt werden, dass für jede Infrastruktur ein individueller Reichweitenbereich existiert, welcher als wirtschaftliche Mindestanforderung aufgefasst werden kann, unterhalb derer die Gesamtsystemkosten prohibitiv hoch wären. Des Weiteren hat die Art der Infrastruktur einen erheblichen Einfluss auf den inkrementellen Mehrwert für zusätzliche Reichweite in unterschiedlichen

Reichweitenbereichen. Dieses Wissen kann für Drohnenhersteller wie auch Anwender für das Design bzw. die Auswahl eines Drohnenentwurfes von großem Nutzen sein.

Hinsichtlich der gegenübergestellten UAV-Systemkonzepte konnte geschlussfolgert werden, dass neben einer möglichst großen Reichweite die Automatisierung des Betriebes in den einzelnen Betriebsbasen der entscheidende Faktor zur Kostenreduktion und Erreichung einer wettbewerbsfähigen Wirtschaftlichkeit ist. So weisen die beiden automatisierten UAV-Systemkonzepte das Potenzial auf, bei ausreichender Reichweite und Auslastung das Kostenniveau neu beauftragter Satellitendaten zu unterbieten. Während mit zunehmender Reichweite die Unterschiede zwischen den Systemen kleiner werden, bleibt doch das hochautomatisierte VTOL-System stets die kosteneffizienteste Variante und wäre auch unter betrieblichen Aspekten sowie hinsichtlich Systemkomplexität und Anfälligkeit innerhalb der UAVs zu bevorzugen.

Die Gegenüberstellung mit Satellitendaten muss weniger verallgemeinernd beantwortet werden. Je dichter das betrachtete Gebiet mit Zielinfrastruktur bestückt ist, desto geringer fallen die Gesamtsystemstückkosten für UAV-gestützte Datenakquisemethoden aus, da die erheblichen Fixkostenanteile auf eine höhere Anzahl an Streckenkilometern umgelegt werden können, während die Streckenkilometerkosten für Satellitendaten konstant bleiben. Umgekehrt bedeutet dies, dass unter reinen Kostenaspekten Satellitendaten in spärlich besetzten Gebieten wie der US Pipelineinfrastruktur einen Vorteil gegenüber UAV-Systemen verteidigen können. Gleichwohl wurde gezeigt, dass sich UAV-Systeme neben der Kostendimension vor allem auch über die höhere erzielbare Qualität der Daten absetzen können. Dies kann je nach verfolgtem Inspektionsinteresse und Spektralbereich in der höheren Auflösung oder aber on-demand Verfügbarkeit bei Wolkenverdeckung liegen.

Von besonderem Interesse für weiterführende Forschungen ist der Aspekt eines möglichen Poolings verschiedener Infrastrukturen in einem Zielgebiet, um so eine höhere Zieldichte und Systemauslastung zu ermöglichen. Eine Hochskalierung des Geschäftsmodells UAV-gestützter Fernerkundung um die gleichzeitige Bearbeitung von Strom-, Pipeline- sowie Bahnnetzaufträgen erscheint sinnvoll und geeignet. Darüber hinaus wäre durchaus denkbar, durch geringere Grenzkosten zusätzlicher Befliegungen über regelmäßige und häufigere Inspektionsintervalle eine höhere Inspektionsqualität für die Assetmanager zu erreichen. Weiterhin wäre insbesondere für die schwebefähigen VTOL-Systeme denkbar, opportunistisch auch Punktziele im Rahmen umfassender Missionen mit abzudecken und somit den adressierbaren Markt noch mehr zu erweitern. Auch wäre je nach Erkenntnisinteresse der Inspektion eine weitere Anreicherung von UAV-Daten um Satellitendaten aus anderen Spektralbereichen denkbar.

Abbildungen

1.1	Schiennetz (DB Netz AG, 2019), Gasfernleitungssystem (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2022), Stromübertragungsnetz (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2020) - Deutschland	2
1.2	Erdgas Fernleitungsnetz der USA (Zaffos, 2015)	3
1.3	Auswertung von Luftbilddaten für das Vegetationsmanagement von Stromleitungen (Delair, 2020)	6
1.4	Eine VTOL Drohne des Anbieters Quantum Systems im Testbetrieb bei der Deutschen Bahn (Köhn, 2020)	7
1.5	Ein Erdbeobachtungssatellit der Airbus Group (GIM, 2017)	7
1.6	Operationsradien um eine beispielhafte Konfiguration von Startbasen	9
1.7	Bodenspur eines Erdbeobachtungssatelliten mit einer Inklination von 53° (Wikipedia, 2011)	9
2.1	Nutzung des elektromagnetischen Spektrums für Fernerkundungssensorik (Albertz, 2001 , S.11)	14
2.2	Elektromagnetische Welle (Wikimedia, 2018)	15
2.3	Elektrischer Feldanteil einer elektromagnetischen Welle (Li, 2021 , S. 3)	15
2.4	Spektralverteilung einer Schwarzkörperstrahlenquelle bei diskreten Temperaturniveaus (Kuriakose, 2013 , S. 32)	18
2.5	Funktionsschema eines LIDAR Sensors (Wandinger, 2005 , S. 3)	19
2.6	Sensitivität von Zapfen- und Stäbchenzellen des menschlichen Auges (in Anlehnung an Bowmaker und Dartnall, 1980 , S. 505)	21
2.7	Datenwürfel einer Hyperspektralaufnahme des Vulkan Vesuv (ESA, 2021)	22
2.8	Ground Sampling Distance (GSD) abhängig von Flughöhe, Brennweite und Sensorpitch. Angelehnt an Leachtenauer und Driggers (2001, S. 31)	25

2.9	Einfluss des Rollwinkels auf die Projektionsflächenverschiebung in Abhängigkeit von Flughöhe und korrespondierender Brennweite . . .	29
2.10	Indikation für das Preisniveau von Satellitendaten im Jahr 2020, angelehnt an <i>Chuvieco (2020, S. 115)</i>	34
2.11	Preisliste für Satellitendaten aus dem Jahr 2018 (<i>LANDinfo - World Wide Mapping LLC, 2018</i>)	35
2.12	Preisliste für Satellitendaten aus dem Jahr 2022 (nicht öffentliche Preisangebote)	36
3.1	Höchstspannungsnetzkarte Deutschland (<i>Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2020</i>)	40
3.2	Netzebenen des deutschen Stromsystems (<i>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022</i>)	42
3.3	Arten. von Freileitungsmasten (<i>Becker, 2020, S. 1197</i>)	43
3.4	Anhaltende Stromausfälle verursacht durch einwachsende Vegetation - USA (<i>Miller, 2020</i>)	45
3.5	Anhaltende Stromausfälle verursacht durch umfallende Bäume von außerhalb des Wegerechtes der Netzbetreiber - USA (<i>Miller, 2020</i>)	45
3.6	Standbild einer Thermalkamera von einem technischen Leitungsdefekt, welcher zu einer Hitzequelle führt (<i>Schultze, 2020, S.716</i>)	46
3.7	Koronaentladung am Koronaring einer 500-kV-Freileitung (<i>Cor, 2013</i>)	47
3.8	LIDAR Vermessung der Mastgeometrie sowie der angrenzenden Stromleitungen (<i>Schultze, 2020, S.717</i>)	47
3.9	Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland (<i>Our World in Data, 2022a</i>)	48
3.10	Globaler Primärenergieverbrauch nach Energieträgern (<i>Our World in Data, 2022b</i>)	49
3.11	Das deutsche Gasfernleitungsnetz (<i>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2022</i>)	50
3.12	Verdichterstation der North Stream Pipelines in Lubmin (<i>Joachim Schmidt, 2022</i>)	51
3.13	Errichtung einer Erdgaspipeline (<i>National Parks Conservation Association, 2007</i>)	52
3.14	Das deutsche Schienennetz (dick = Hauptstrecke, dünn = Nebenstrecke, blau = elektrifiziert, grau = nicht elektrifiziert) (<i>DB Netz AG, 2019</i>)	55
3.15	Regionale Verteilung des Eisenbahntransportes nach Personenkilometern (Pkm), Tonnenkilometern (Tkm) und Streckenlänge (lines) (<i>International Union of Railways, 2020</i>)	56

3.16	Dichte der Schienennetze nach Staat (<i>International Union of Railways, 2020</i>)	58
4.1	Instanz eines Vehicle Routing Problems (<i>Toth und Vigo, 2002a</i> , S. 110ff.)	65
4.2	Flowchart des erstellten Algorithmus zur Routenoptimierung	69
4.3	Starrflügel UAV mit herkömmlichem Fahrwerk auf einer befestigten Landebahn (<i>Hanseativ Aviation Solutions, 2022</i>)	74
4.4	ElektRail Start- / Landesystem (Prototyp) mit UAV	78
4.5	Funktionsweise eines ElektRail Start- / Landesystems	78
4.6	Automatisierte Betriebsbasis für eine VTOL Drohne der Firma Beagle (<i>Hamburg Aviation Cluster, 2022</i>)	81
4.7	VTOL Drohne des Anbieters Quantum Systems im Testbetrieb bei der Deutschen Bahn (<i>Köhn, 2020</i>)	81
5.1	Routing Lösung einer Mission für acht Betriebsbasen und 500 km Drohnenreichweite	89
5.2	Vergleich von Routingführungen in Süd-West-Deutschland mit einer Drohnenreichweite von 674 km (l) und 1100 km (r) bei vier Betriebsbasen	90
5.3	Gesamtmissionslängen nach verfügbarer Reichweite und Basenkonfiguration	91
5.4	Durchschnittliche Reichweitemaximierung	91
5.5	Missionsanteil über der Zielinfrastruktur	92
5.6	Minimale Gesamtmissionslänge bei jeweils optimaler Basenkonfiguration	93
5.7	Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen	95
5.8	Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	95
5.9	Kosten je Flugstunde für unterschiedliche Basenkonfigurationen	96
5.10	Kosten je Flugstunde der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	96
5.11	Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration	97
5.12	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration	98
5.13	Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	99
5.14	Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	100

5.15	Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen	100
5.16	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen	101
5.17	Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen . .	102
5.18	Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	102
5.19	Kosten je Flugstunde für unterschiedliche Basenkonfigurationen . .	103
5.20	Kosten je Flugstunde der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	103
5.21	Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration	104
5.22	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration	105
5.23	Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	105
5.24	Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	106
5.25	Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen	107
5.26	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen	108
5.27	Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen . .	109
5.28	Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	109
5.29	Kosten je Flugstunde für unterschiedliche Basenkonfigurationen . .	110
5.30	Kosten je Flugstunde der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	110
5.31	Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration	111
5.32	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration	111
5.33	Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	112
5.34	Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	113
5.35	Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen	114
5.36	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen	115

5.37	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen	117
5.38	Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen	117
5.39	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen	118
5.40	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen	119
5.41	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen	120
5.42	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen	120
5.43	Missionskosteneinsparungen je km zusätzlicher UAV Reichweite	122
5.44	Missionskosteneinsparungen je einzelner UAV je km zusätzlicher UAV Reichweite	122
5.45	Routing Lösung für das US Erdgas Fernleitungsnetz mit 50 Betriebsbasen und 1300 km verfügbarer Reichweite	124
5.46	Pipeline - Durchschnittliche Reichweitennutzung	125
5.47	Pipeline - Durchschnittliche Reichweitennutzung	126
5.48	Anteil der Missionsstrecke über der Zielinfrastruktur	127
5.49	Minimale Gesamtmissionslänge bei jeweils optimaler Basenkonfiguration	127
5.50	Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen	128
5.51	Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	129
5.52	Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration	130
5.53	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration	130
5.54	Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	131
5.55	Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	131
5.56	Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen	132
5.57	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen	132
5.58	Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen	133

5.59	Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	134
5.60	Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration	134
5.61	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration	135
5.62	Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	136
5.63	Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	136
5.64	Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen	137
5.65	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen	137
5.66	Gesamtmissionskosten für unterschiedliche Basenkonfigurationen	138
5.67	Gesamtmissionskosten der jeweils kostenminimalen Basenkonfiguration	139
5.68	Kostenbestandteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration	140
5.69	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration	140
5.70	Minimale Missionskosten bei 0 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	141
5.71	Minimale Missionskosten bei 2500 Flugtagen Fixkostendeckung aus anderen Aufträgen	141
5.72	Kostenartenanteile der jeweils optimalen Basenkonfiguration bei 0 externen Flugtagen	142
5.73	Kostenartenanteile der jeweils besten Basenkonfiguration bei 2500 externen Flugtagen	142
5.74	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen	144
5.75	Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 0 externen Flugtagen	144
5.76	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen	145
5.77	Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 500 externen Flugtagen	146
5.78	Direkter Missionskostenvergleich unterschiedlicher Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen	147
5.79	Direkter Kostenvergleich je Streckenkilometer für unterschiedliche Gesamtsysteme bei 2500 externen Flugtagen	147

5.80	Missionskosteneinsparungen je km zusätzlicher UAV Reichweite . . .	148
5.81	Missionskosteneinsparungen je einzelner UAV je km zusätzlicher UAV Reichweite	149

Tabellen

2.1	Maximale Fluggeschwindigkeit bei Nutzung einer Phase One iXM-RS280F Kamera in Abhängigkeit von Flughöhe, GSD, Belichtungszeit und der daraus resultierenden maximalen Fluggeschwindigkeit (<i>PhaseOne, 2022</i>)	27
2.2	Statische GSD-Auflösung und (Brennweite) nach Flughöhe (Herstellerangaben)	28
2.3	Anwendungsbereiche für SAR-Satellitendaten (<i>Moreira et al., 2013, S. 37</i>)	30
2.4	Spezifikationen ausgewählter aktueller Satellitenkonstellationen zur Erdbeobachtung (Hersteller- / Betreiberangaben)	32
2.5	Übersicht physikalischer Prinzipien zur Fernerkundung	37
3.1	Befliegungsintervalle für Erdgasfernleitungen in Deutschland (<i>Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2018</i>)	54
3.2	Befliegungsintervalle für Erdgasfernleitungen in den USA (<i>Cornell Law School, 2022</i>)	54
3.3	Staaten mit den größten Schienennetzwerken sowie deren geographischen Dichte (<i>Central Intelligence Agency, 2022</i>)	57
4.1	Annahmen zu Personalkosten	75
4.2	Annahmen zu Kapitalkosten	76
4.3	Annahmen zu Wartung und Verbrauchsmaterial	77
4.4	Annahmen zu Personalkosten	79
4.5	Annahmen zu Kapitalkosten	79
4.6	Annahmen zu Wartung und Verbrauchsmaterial	80
4.7	Annahmen zu Kapitalkosten	82
4.8	Annahmen zu Wartung und Verbrauchsmaterial	83

Literaturverzeichnis

- (2013). Corona discharge on corona ring of 500 kV overhead power line. https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge. Accessed: 2021-01-21.
- (2017). Eni to Utilise Earth Observation Satellite Data and Services. <https://www.gim-international.com/content/news/eni-to-utilise-earth-observation-satellite-data-and-services>. Accessed: 2021-01-31.
- (2023). Phase One P5. https://www.phaseone.com/wp-content/uploads/2024/01/P5_Brochure_Display_EN_2023.pdf. Accessed: 2024-08-25.
- Aasen, H., Honkavaara, E., Lucieer, A., und Zarco-Tejada, P. J. (2018). Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: a review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, 10(7):1091.
- Abbott, B., Abbott, R., Adhikari, R., Ajith, P., Allen, B., Allen, G., Amin, R., Anderson, S., Anderson, W., Arain, M., u a. (2009). LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory. *Reports on Progress in Physics*, 72(7):076901.
- Adabo, G. J. u a. (2013). Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system. *Auvsis's unmanned systems*.
- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., und Sousa, J. J. (2017). Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote sensing*, 9(11):1110.
- Agora Energiewende (2021). Klimaneutrales Deutschland 2045. *Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*.
- Albertz, J. (2001). *Einführung in die Fernerkundung : Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wiss. Buchges., Darmstadt, 2., überarb. und erw. Aufl.. Auflage.
- Alvarado, M., Gonzalez, F., Erskine, P., Cliff, D., und Heuff, D. (2017). A Methodology to Monitor Airborne PM10 Dust Particles Using a Small Unmanned Aerial Vehicle. *Sensors*, 17(2).
- American Society of Mechanical Engineers (2004). ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems.
- American Society of Mechanical Engineers (2004). ASME B31.8: Gas Transmission and Distribution Piping Systems.

- Amin, M. und Stringer, J. (2008). The electric power grid: Today and tomorrow. *MRS bulletin*, 33(4):399–407.
- Baker Hughes (2019). BHGE Launches LUMEN: Ground & Drone-based Advanced Methane Detection & Reduction System. Accessed: 2022-01-25.
- Bartolo, N., Caprini, C., Domcke, V., Figueroa, D. G., Garcia-Bellido, J., Guzzetti, M. C., Liguori, M., Matarrese, S., Peloso, M., Petiteau, A., u a. (2016). Science with the space-based interferometer LISA. IV: Probing inflation with gravitational waves. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(12):026.
- Becker, C. (2020). Stromnetze. In *Erneuerbare Energien*, Seiten 1153–1202. Springer.
- Beyer, A. (2018). Einführung: Grundlagen der Funktionsweise von Energieinfrastruktur und Möglichkeiten zur Neuordnung des Sektors. In *Die stagnierende Energiewende in den USA und China*, Seiten 23–48. Springer.
- Boain, R. J. (2004). AB-Cs of sun-synchronous orbit mission design.
- Borneburg, D. (2004). Detektion, Lokalisierung und Echtzeitdarstellung von Korona-Entladungen an elektrischen Betriebsmitteln mittels Visualisierung der UV-Emission. In Kindersberger, J., Herausgeber, *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel: Vorträge der 97. ETG-Fachtagung am 09. und 10. März in Köln*, Seiten 73–78. Margret Schneider.
- Bowmaker, J. K. und Dartnall, H. (1980). Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal of physiology*, 298(1):501–511.
- Breeveld, A. A., Curran, P. A., Hoversten, E. A., Koch, S., Landsman, W., Marshall, F. E., Page, M. J., Poole, T. S., Roming, P., Smith, P. J., Still, M., Yershov, V., Blustin, A. J., Brown, P. J., Gronwall, C., Holland, S. T., Kuin, N. P. M., McGowan, K., Rosen, S., Boyd, P., Broos, P., Carter, M., Chester, M. M., Hancock, B., Huckle, H., Immler, S., Ivanushkina, M., Kennedy, T., Mason, K. O., Morgan, A. N., Oates, S., De Pasquale, M., Schady, P., Siegel, M., und Vanden Berk, D. (2010). Further calibration of the Swift ultraviolet/optical telescope. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406(3):1687–1700.
- Browell, E., Ismail, S., und Grant, W. (1998). Differential absorption lidar (DIAL) measurements from air and space. *Applied Physics B*, 67(4):399–410.
- Browell, E., Ismail, S., und Grant, W. (2003). LIDAR | DIAL. In Holton, J. R., Herausgeber, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Seiten 1183–1194. Academic Press, Oxford.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2022). Das deutsche Gas-Fernleitungsnetz im Überblick. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022). Ein Stromnetz für die Energiewende. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/netze-und-netzausbau.html>. Accessed: 2022-12-18.

- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2016). Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 463 (A). Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Errichtung.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2018). Technische Regel - Arbeits- blatt DVGW G 466-1 (A). Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Betrieb und Instandhaltung.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2019). Energiemarkt Deutschland 2019. https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20190603_BDEW-Energiemarkt-Deutschland-2019.pdf. Accessed: 2021-01-25.
- Burke, B. F., Graham-Smith, F., und Wilkinson, P. N. (2019). *An introduction to radio astronomy*. Cambridge University Press.
- Callahan, D. und Berber, M. M. (2022). Vertical accuracy of the USGS 3DEP program data: study cases in Fresno County and in Davis, California. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 28.
- Carlson, J., Wiles, J., Carlson, J., Jaffe, A., Wiles, A., Institute, C. M., und Society, A. M. (2006). *The Millennium Prize Problems*. Amsns AMS non-series Title Series. American Mathematical Society.
- Central Intelligence Agency (2022). The World Factbook - Country Comparisons - Railways. <https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/railways/country-comparison>. Accessed: 2021-01-25.
- Cerezo, G. (2020). Wie man Drohnen in der Öl & Gasindustrie nutzen kann - Teil 1.
- Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of satellite remote sensing : an environmental approach*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, third edition. Auflage. Literaturverzeichnis: Seite 367-398.
- Clarke, G.; Wright, J. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4):568–581.
- Cornell Law School (2022). Class locations. accessed: 13.10.2021.
- Cottingham, W. N. und Greenwood, D. A. (2007). *An introduction to the standard model of particle physics*. Cambridge university press.
- DB Netz AG (2019). Strecken und Bauwerke nach INSPIRE. accessed: 13.10.2021.
- de Moura, Y. M., Galvão, L. S., Hilker, T., Wu, J., Saleska, S., do Amaral, C. H., Nelson, B. W., Lopes, A. P., Wiedeman, K. K., Prohaska, N., u a. (2017). Spectral analysis of amazon canopy phenology during the dry season using a tower hyperspectral camera and modis observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131:52–64.
- Delair (2020). Simplifying vegetation management for power lines with drones, digital twins and artificial intelligence. <https://delair.aero/power-utilities/simplifying-vegetation-management-for-power-lines-with-drones-digital-twins-and-artificial-intelligence/>. Accessed: 2021-02-03.

- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (2018). Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G 466-1 (A). Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Betrieb und Instandhaltung.
- DIN Normenausschuss Bauwesen (2017). Photogrammetrie und Fernerkundung – Begriffe (DIN 18716:2017-06).
- DJI (2019a). Eliminate Grid Downtime With Drone Inspection. <https://enterprise-insights.dji.com/user-stories/eliminate-grid-downtime-with-drone-inspection>. Accessed: 2022-01-19.
- DJI (2019b). Scaling Out Powerline Inspection with Drone Technology. <https://enterprise-insights.dji.com/user-stories/china-southern-grid-powerline-inspection>. Accessed: 2022-01-19.
- Edge Autonomy (2022). "Penguin C VTOL MIL UAS - Long-range tactical VTOL UAS Solutions".
- ElMasry, G. und Sun, D.-W. (2010). Principles of hyperspectral imaging technology. In *Hyperspectral imaging for food quality analysis and control*, Seiten 3–43. Elsevier.
- Emery, B. und Camps, A. (2017). *Introduction to satellite remote sensing: atmosphere, ocean, land and cryosphere applications*. Elsevier.
- ESA (2021). Going hyperspectral for CHIME. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Going_hyperspectral_for_CHIME. Accessed: 2022-05-06.
- Falconi, M. T., von Lerber, A., Ori, D., Marzano, F. S., und Moisseev, D. (2018). Snowfall retrieval at X, Ka and W bands: consistency of backscattering and microphysical properties using BA ECC ground-based measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(5):3059–3079.
- Federal Aviation Administration (FAA) of the United States (2011). *Flight Navigator Manual*.
- Ferguson Nick (VP Infrastructure - LiveEO) (2021). Preventing Unpreventable Outages. <https://www.linkedin.com/pulse/preventing-unpreventable-outages-nick-ferguson/>. Accessed: 2021-01-25.
- Fossum, E. R. (1997). CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip. *IEEE transactions on electron devices*, 44(10):1689–1698.
- GlobalData (2022). The US has the highest share in global oil & gas transmission pipeline network. <https://www.offshore-technology.com/comment/us-oil-gas-pipeline-network/#:~:text=Among%20regions%2C%20North%20America%20has,Asia%20with%20243%2C772km%2C%20respectively>. Accessed: 2022-01-12.
- Greatwood, C., Richardson, T. S., Freer, J., Thomas, R. M., MacKenzie, A. R., Brownlow, R., Lowry, D., Fisher, R. E., und Nisbet, E. G. (2017). Atmospheric Sampling on Ascension Island Using Multicopter UAVs. *Sensors*, 17(6).

- Guan, H., Sun, X., Su, Y., Hu, T., Wang, H., Wang, H., Peng, C., und Guo, Q. (2021). UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130:106987.
- Hagen, N. A. und Kudenov, M. W. (2013). Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering*, 52(9):090901.
- Hamburg Aviation Cluster (2022). Beagle Systems und Westnetz starten Stromleitungs-Inspektion per Drohne.
- Hanseativ Aviation Solutions (2022). High Performance Drones.
- Hesselbarth, K., Lenz, J., und Siegert, W. (2001). Gashochdruckleitungen. Sicherheit und Qualität ; ausgewählte aktualisierte Beiträge aus den Iro-Workshops 1990 - 1999. In *Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, Bd. 23*. Vulkan-Verl., Essen, Germany.
- Ilioudis, C. (2021). Introduction to radar signal processing. *University of Strathclyde*. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: [https://udrc.eng.ed.ac.uk/sites/udrc.eng.ed.ac.uk/files/attachments/Introduction% 20Radar% 20signal% 20processing.pdf](https://udrc.eng.ed.ac.uk/sites/udrc.eng.ed.ac.uk/files/attachments/Introduction%20Radar%20signal%20processing.pdf).
- International Union of Railways (2020). Rail transport in the world. <https://uic.org/support-activities/statistics/>. Accessed: 2021-01-25.
- Ivashov, S. I., Tataraidze, A. B., Razevig, V. V., und Smirnova, E. S. (2019). Railway Transport Infrastructure Monitoring by UAVs and Satellites. *Journal of Transportation Technologies*, 9(3):342–353.
- Joachim Schmidt (2022). Die Nord Stream Pipeline. <https://unser-lubmin.de/nord-stream-pipeline/>. Accessed: 2023-01-06.
- Kemfert, C., Präger, F., Braunger, I., Hoffart, F. M., und Brauers, H. (2022). The expansion of natural gas infrastructure puts energy transitions at risk. *Nature Energy*, 7(7):582–587.
- Korte, B. und Vygen, J. (2018). *Combinatorial Optimization*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Krueger, A. (2014). *Ultraviolet Sensors*, Seiten 860–869. Springer New York, New York, NY.
- Kuriakose, M. (2013). *Thermal Investigations on Polymer dispersed liquid Crystal Composites & thermo-electric Polymer Composites using photothermal Techniques*. Dissertation.
- Köhn, R. (2020). Mit Drohnen autonom über Gleise fliegen. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/mit-drohnen-autonom-ueber-gleise-fliegen-17065451.html>. Accessed: 2021-01-31.
- LANDinfo - World Wide Mapping LLC (2018). Buying Satellite Imagery: Pricing Information for High Resolution Satellite Imagery. <http://landinfo.com/satellite-imagery-pricing/>. Accessed: 2022-08-23.

- Leachtenauer, J. und Driggers, R. (2001). *Surveillance and Reconnaissance Imaging Systems-Modeling and Performance Prediction*. Artech House.
- Lee, T., Mckeever, S., und Courtney, J. (2021). Flying Free: A Research Overview of Deep Learning in Drone Navigation Autonomy. *Drones*, 5(2).
- Li, J. (2021). *Satellite Remote Sensing Technologies*. Springer.
- Lin, S. (1965). Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. *Bell Systems Technical Journal*, 44(10):2245–2269.
- Lin, S. und Kernighan, B. W. (1973). An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 21(2):498–516.
- Lu, B., Dao, P. D., Liu, J., He, Y., und Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. *Remote Sensing*, 12(16):2659.
- MacKay, D. J. C. (2011). *Information theory, inference, and learning algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mahnke, P. (2019). Erdgasleitungsüberprüfung aus der Luft (CHARM®). https://www.dlr.de/tp/Portaldata/39/Resources/Handout_CHARM.pdf. Accessed: 2021-01-25.
- Marx, L., Moßmann, D., und Kullmann, H. (2003). *Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaues*, Band 8. Bahn Fachverlag.
- mb+ Partner (2022). The ElektRail Project - The Mobile Runway System.
- Miller, R. (2020). FAC-003-4 Revisited. <https://wearecnuc.com/fac-003-4-revisited/>. Accessed: 2023-01-25.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., und Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1):6–43.
- Mundschau, M. und Quint, I. (2020). Asset-Management–Versorgungsnetze digital steuern. In *Realisierung Utility 4.0 Band 1*, Seiten 795–803. Springer.
- National Parks Conservation Association (2007). Construction of the Gas Pipeline. <https://www.flickr.com/photos/113842093@N02/19153010824/>. Accessed: 2023-01-06.
- Nayak, P. B., Verma, S., und Kumar, P. (2012). Ultrawideband (UWB) antenna design for cognitive radio. In *2012 5th International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC)*, Seiten 1–4. IEEE.
- Nguyen, V. N., Jenssen, R., und Roverso, D. (2018). Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99:107–120.
- Ni, J., Yao, L., Zhang, J., Cao, W., Zhu, Y., und Tai, X. (2017). Development of an Unmanned Aerial Vehicle-Borne Crop-Growth Monitoring System. *Sensors*, 17(3).

- Our World in Data (2022a). Energy Consumption by Source, Germany. <https://ourworldindata.org/energy/country/germany>. Accessed: 2023-01-06.
- Our World in Data (2022b). Energy Consumption by Source, World. <https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-country?stackMode=absolute>. Accessed: 2023-01-06.
- Phase One (2022). iXM-RS280F - The new standard in large format aerial imaging. <https://geospatial.phaseone.com/cameras/ixm-rs280f/>. Accessed: 2022-07-06.
- PhaseOne (2022). White Paper - Phase One 280MP Aerial Solution. Technischer bericht.
- Piotto, G., Milone, A. P., Bedin, L. R., Anderson, J., King, I. R., Marino, A. F., Nardiello, D., Aparicio, A., Barbuy, B., Bellini, A., Brown, T. M., Cassisi, S., Cool, A. M., Cunial, A., Dalessandro, E., D'Antona, F., Ferraro, F. R., Hidalgo, S., Lanzoni, B., Monelli, M., Ortolani, S., Renzini, A., Salaris, M., Sarajedini, A., van der Marel, R. P., Vesperini, E., und Zoccali, M. (2015). The Hubble Space Telescope UV legacy survey of galactic globular clusters. I. Overview of the project and detection of multiple stellar populations. *The Astronomical Journal*, 149(3):91.
- Predehl, P., Andritschke, R., Arefiev, V., Babyshkin, V., Batanov, O., Becker, W., Böhringer, H., Bogomolov, A., Boller, T., Borm, K., u a. (2021). The eROSITA X-ray telescope on SRG. *Astronomy & Astrophysics*, 647:A1.
- Quimby, R. S. (2006). *Photonics and lasers: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Rathlev, F., Meyer, und Benedikt; Juerss, S. (2012). Innovative technologies for aerial survey of gas pipes. *Gas for Energy*, (2).
- Richards, M. A., Scheer, J., Holm, W. A., und Melvin, W. L. (2010). Principles of modern radar.
- Riemer, G. (2011). 10 Minuten Transport und Netz: Von der Pipeline in die Heizung. In *Energie in 60 Minuten*, Seiten 39–53. Springer.
- Rodríguez-Gómez, N., Zaccarelli, N., und Bolado-Lavín, R. (2015). Improvements in the EU gas transmission network between 2009 and 2014. *JRC Science for Policy Report*. Brussels: European Union.
- Schofield, O. B., Lorenzen, K. H., und Ebeid, E. (2020). Cloud to Cable: A Drone Framework for Autonomous Power line Inspection. In *2020 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, Seiten 503–509.
- Schultze, N. (2020). Spektrale Fernerkundung und Airborne Laserscanning von Freileitungen per Helikopter. In *Realisierung Utility 4.0 Band 1*, Seiten 711–722. Springer.
- Sharda, R., Voß, S., Golden, B., Raghavan, S., und Wasil, E. (2008). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1. Auflage.

- Sherrah, J. (2016). Fully convolutional networks for dense semantic labelling of high-resolution aerial imagery. *arXiv preprint arXiv:1606.02585*.
- Singh, S. C., Zeng, H., Guo, C., und Cai, W. (2012). Lasers: fundamentals, types, and operations. *Nanomaterials: processing and characterization with lasers*, Seiten 1–34.
- Spitzer, H. und Marwitz, S. (2020). Strategisches Asset-Management im Rahmen der Digitalisierung–Positionierung, Nutzen, Praxisbeispiel. In *Realisierung Utility 4.0 Band 1*, Seiten 693–709. Springer.
- Statista (2022). Krankheitsbedingte Fehltage im Jahr je Arbeitnehmer in Deutschland von 1991 bis 2021.
- Stoker, J. und Miller, B. (2022). The Accuracy and Consistency of 3D Elevation Program Data: A Systematic Analysis. *Remote Sensing*, 14(4):940.
- Suo, Z., Lu, Y., Liu, J., Ding, J., Yin, D., Xu, F., und Jiao, J. (2021). Ultraviolet remote sensing of marine oil spills: a new approach of Haiyang-1C satellite. *Opt. Express*, 29(9):13486–13495.
- Sánchez-Rodríguez, A., Soilán, M., Cabaleiro, M., und Arias, P. (2019). Automated Inspection of Railway Tunnels’ Power Line Using LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing*, 11(21).
- Thyssengas (2020). Inspektion von Pipelines per Drohne.
- Toro, F. G. und Tsourdos, A. (2018a). *UAV-Based Remote Sensing Volume 2*, Band 1. MDPI.
- Toro, F. G. und Tsourdos, A. (2018b). *UAV-Based Remote Sensing Volume 2*, Band 2. MDPI.
- Toro, F. G. und Tsourdos, A. (2018c). *UAV or drones for remote sensing applications*, Band 1. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Toro, F. G. und Tsourdos, A. (2018d). *UAV or drones for remote sensing applications*, Band 2. MDPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Toth, P. und Vigo, D. (2002a). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
- Toth, P. und Vigo, D. (2002b). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
- Toth, P. und Vigo, D. (2002c). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.
- Tzanakakis, K. (2021). *Managing Risks in the Railway System : A Practice-Oriented Guide*. Springer Tracts on Transportation and Traffic. Springer International Publishing, Cham, 1st ed. 2021.. Auflage.
- United Nations Economic Commission for Europe (2020). Pipeline Safety. <https://unece.org/trade/wp6/groups/pipeline-safety>. Accessed: 2022-01-25.
- United Nations Economic Commission for Europe (2021). Pipeline Safety.

- U.S. Energy Information Administration (2018). Homeland Infrastructure Foundation-Level Data (HIFLD): Natural Gas Pipelines.
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (2020). Deutsches Höchstspannungsnetz. <https://www.vde.com/resource/blob/1941438/44d7d556e6b5b7cd1e2f6cae0e5ce501/vde-fnn-karte-stromnetz-deutschland-2020-data.pdf>.
- Vetrella, A. R., Fasano, G., Accardo, D., und Moccia, A. (2016). Differential GNSS and Vision-Based Tracking to Improve Navigation Performance in Cooperative Multi-UAV Systems. *Sensors*, 16(12).
- Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L., und Gonzalez, F. (2016). Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. *Sensors*, 16(12).
- Wandinger, U. (2005). Introduction to lidar. In *Lidar*, Seiten 1–18. Springer.
- Wang, Z. und Sheu, J.-B. (2019). Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122:350–364.
- Wikimedia (2018). Electromagnetic Wave. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_waves.png. Accessed: 2022-05-06.
- Wikipedia (2011). Bodenspur des Satelliten ROSAT bei 5-stündiger Beobachtung (Feb. 2011). <https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenorbit#/media/Datei:Rosat1103.png>. Accessed: 2021-01-31.
- Woldeyohannes, A. D. und Majid, M. A. A. (2011). Simulation model for natural gas transmission pipeline network system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1):196–212. Modeling and Performance Analysis of Networking and Collaborative Systems.
- Wolf, J., Hofmann, D., und Niessen, J. (2018). Schnellfahrende Zustandsuntersuchung von Bahntrassen mit dem Georadar-Verfahren. In *Fachtagung Bauwerksdiagnose 2018*.
- Zaffos, J. (2015). Sorting Science from Dread. <https://www.jsg.utexas.edu/news/2015/11/sorting-science-from-dread/>. Accessed: 2021-01-31.
- Zweig, B.-W. und Stephan, A. (2019). *Energieversorgung elektrischer Bahnen*, Seiten 711–785. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.