



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für
Raumfahrtssysteme



R XXXX X

CubeSat-based active debris removal

Institut für Raumfahrtssysteme

Florian Czorny, Frederik Schäfer,
Marc Strempel, Oussama Mouhaya,
Valentina Dietrich

21. Mai 2019



Technische Universität Braunschweig | Institut für Raumfahrtssysteme
Hermann-Blenk-Str. 23 | 38108 Braunschweig | Deutschland

Technische Universität
Braunschweig
Institut für Raumfahrtssysteme

Institutsleitung

Hermann-Blenk-Str. 23
38108 Braunschweig
Deutschland

Prof. Dr.-Ing.
Enrico Stoll

Tel. +49 (0) 531 391-9960
Fax +49 (0) 531 391-9966
e.stoll@tu-braunschweig.de
www.space-systems.eu

Aufgabenstellung für die Projektarbeit SS 2019

Title:

Analysis of a CubeSat-based ADR-Mission

Analyse einer ADR-basierten CubeSat-Mission

Datum: 01. Mai 2019

Ihr Zeichen:

Ihre Nachricht vom:

Unser Zeichen: EnS/KBL

Unsere Nachricht vom:

A safe and secure space environment is a requirement for all current and future space activities. Analyses performed by ESA and NASA indicate that the only means of sustaining the orbital environment at a safe level for space operations will be by carrying out active debris removal and end-of-life de-orbiting or re-orbiting of future space assets. While new mitigation standards need to be adopted and reliability to be improved, it is expected that even with strict compliance with mitigation guidelines and high adherence to reliability best practices, considering the number of satellites involved, ADR will remain a vital necessity to stabilize the space debris environment. The needed ADR solution must be affordable and achieve a high technology readiness level.

The key to success in achieving reliable and efficient removal of space debris is to focus on the recent evolution trends in space industry and take advantage from advances in space technology such as CubeSat COTS-parts to develop an adapted solution to the evolving space debris issue. The solution should be thoroughly tested and demonstrated in relevant environments.

To realize this, a series of technological challenges has to be addressed. The Goal of this work is to investigate **CubeSat-based ADR** mission. In particular the **mission design and the CubeSat system design** are to be analyzed. The following detailed tasks must be performed:

1. First of all, a literature research has to be performed based on the supervisor's previous works [1], including the following topics:
 - a. Rendezvous mission and satellite design overview.
 - b. Bio inspired Docking technology.
 - c. CubeSat Hardware overview.

- d. Familiarizing with GMAT and QuSAD software.
2. Subsequently, the **mission and system design are to be defined** for a CubeSat based ADR mission. The work includes the following steps:
 - a. Define relevant mission scenario for CubeSat based ADR using methodical approaches based on previous works [1,2] and the results from task 1. This includes the specification of each mission phase in terms of number of: orbits (time), used sensors, used actuators, etc...
 - b. Select a Bio-inspired docking concept based on the results of supervisor's on-going work and results from task 1.
 - c. Define relevant CubeSat configurations based on basic budgets estimations and the results from [2].
3. Deliver a **proof of concept for mission and CubeSat design**. The Proof focuses on the feasibility of the de-orbit phase based on the selected CubeSat configurations and the constraints dictated by mission design and the CubeSat calculated budgets. The work includes the following steps:
 - a. Update the database of the software tool QuSAD with all relevant subsystems.
 - b. Perform detailed Budget evaluation of identified CubeSat configurations using methodical approaches based on the results from task 1, 2 and the report from [2].
 - c. Perform detailed de-orbit sensitivity analysis of the selected CubeSat configurations using GMAT software.
 - d. Define envelope of target parameters which can be removed using the selected concept
 - e. Evaluate the feasibility of CubeSat-based ADR for prominent announced constellations such as Starlink, OneWeb, etc...
4. The work described in points 1 to 4 shall be elaborated in writing and presented in a final presentation. The results, raw data as well as the created software tools are to be made available to at least one IRAS employee for archiving and further processing.

At the beginning of the work, a definition and description of individual work packages (Work Breakdown Structure, Work Package Description) are to be compiled to a project schedule. The work has to be done according to the guidelines of the Institute of Space Systems and has to be handed over in two copies (original and copy).

The Institute of Space Systems supports the scientific publication of the results of student work with prior approval. However, the results of the work may only be carried out after consultation with the supervising institutions. This work may be provided to third parties only after consultation with the supervising institutions. The work remains the property of the supervising institutions.

Literature:

- [1] M.K. Ben Larbi et. al., *Active Debris Removal for Mega Constellations: CubeSat Possible?*, 9th International Workshop on Satellite Constellations and Formation Flying, 2017
[2] M. Lettau, *Rendezvous Architecture and Validation Process for CubeSat based Active Debris Removal*, Master thesis, TU Braunschweig, 2019

Dipl-Ing. Mohamed Khalil Ben Larbi

Eidesstattliche Erklärung

Wir erklären hiermit an Eides Statt, dass wie die nachfolgende Arbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Literatur angefertigt haben.

Datum, Unterschrift Florian Czorny

Datum, Unterschrift Frederik Schäfer

Datum, Unterschrift Marc Strempel

Datum, Unterschrift Oussama Mouhaya

Datum, Unterschrift Valentina Dietrich

Übersicht

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
1.1. Motivation	8
1.2. Problemstellung	8
1.3. State of the Art	8
2. Theoretische Grundlagen	9
2.1. Das Cubesat Designstandard	9
2.1.1. Historische Entwicklung	9
2.1.2. Standard Definition	9
2.2. Cubesat Subsysteme	9
2.2.1. Antrieb - propulsion	9
2.2.2. Energie - EPS	9
2.2.3. Guidance, navigation and control -GNC ADCS	9
2.2.4. Command and data handling	9
2.2.5. Communications	9
2.2.6. Thermal	9
2.2.7. Structure	9
2.3. RDVDO Mechanismen	9
2.3.1. Docking Strategien	9
2.3.2. Bionische Materialien	9
3. Cubesat-und Missionsdesign	10
3.1. QuSAD	10
3.1.1. Was ist QuSAD	10
3.1.2. Anwendungsbereich	10
3.2. Cubesat- Designanalyse	10
3.2.1. Angenommenes Design	10
3.2.2. Triebwerkskonstellation	10
3.2.3. Budgetplanung	10
3.2.4. Konfigurationsvergleich	10
3.3. Ausgewähltes Missionsdesign	10
4. Auswertung des CubeSat-based ADR Konzepts	11
4.1. Bewertungsstrategie	11
4.1.1. Kriterien der Bewertung	11
4.1.2. GMAT	11
4.2. Ergebnisse	11
4.2.1. Generated Data	11
4.2.2. Reachability Enveloppe	11

5. Zusammenfassung und Ausblick	13
Fazit und Ausblick	14
Literaturverzeichnis	15
Abbildungsverzeichnis	15
Tabellenverzeichnis	17
Symbolverzeichnis	18
A. Projektmanagement	19
A.1. Work Breakdown Structure	19
A.2. Zeitplan	21
A.3. Work Package Description	23

1 Einleitung

1.1. Motivation

1.2. Problemstellung

1.3. State of the Art

Overview of cooperative RDVDO missions

Overview of uncooperative RDVDO mission

2 Theoretische Grundlagen

2.1. Das Cubesat Designstandard

2.1.1. Historische Entwicklung

2.1.2. Standard Definition

kurz Anwendungsbereich Low-Budget LEO Experimente Interplanetar (InSight) Active Debris Removal Cubesat Missionen Übersicht über bisherige launches und deren payload (Daten und ein Bild zum anpassen existieren schon)

2.2. Cubesat Subsysteme

hier hauptsächlich das Fazit von max kompakt darstellen und referenzieren

2.2.1. Antrieb - propulsion

2.2.2. Energie - EPS

2.2.3. Guidance, navigation and control -GNC ADCS

2.2.4. Command and data handling

2.2.5. Communications

2.2.6. Thermal

2.2.7. Structure

2.3. RDVDO Mechanismen

das kann ausführlich sein

2.3.1. Docking Strategien

Roboterarm Fangnetz Adhäsiv Docken Übersichtstabelle/Graphik: siehe die Quellen die ich am 15.05.2019 gezeigt habe

2.3.2. Bionische Materialien

Was sind Geckomaterialien Bisher getestete Gecko-Materialien Bisherige Erfolge State of the Art Problematik

3 Cubesat-und Missionsdesign

3.1. QuSAD

3.1.1. Was ist QuSAD

3.1.2. Anwendungsbereich

3.2. Cubesat- Designanalyse

3.2.1. Angenommenes Design

Hier die Variante von Max nehmen und kurz beschreiben

3.2.2. Triebwerkskonstellation

Hier alternative Triebwerkskonstellationen bzw. Anpassungen des Gesamtdesigns (wenn nötig) vorschlagen **Triebwerkskonstellation 1**

Triebwerkskonstellation 2

Triebwerkskonstellation 3

etc.

3.2.3. Budgetplanung

Leistungsbudget

Massenbudget

Volumenbudget

Preisbudget

3.2.4. Konfigurationsvergleich

Budgets nur Vergleichen (kein GMAT)

Datenbank soll möglichst nicht nur um die einzelnen Komponenten erweitert werden (ruhig auch andere Komponenten aus der Excel Tabelle in die Datenbank aufnehmen)

3.3. Ausgewähltes Missionsdesign

Kurze Beschreibung aus Max's Arbeit

4 Auswertung des CubeSat-based ADR Konzepts

4.1. Bewertungsstrategie

Die Strategie besteht draus mehrere Simulationen per GMAT für unterschiedliche Konfigs durchzuführen. Die Bewertung fokussiert sich auf die Machbarkeit des De-orbiting (siehe TODOS.txt)

4.1.1. Kriterien der Bewertung

4.1.2. GMAT

4.2. Ergebnisse

4.2.1. Generated Data

For every considered satellite design (=mainly thruster configuration, 3-4 different designs), generate following data:

Deorbit time and spent fuel mass for all:

- Masses from 50-500 kg
- Altitudes from 1400-400? km (ggf. semi-major axis)
- Eccentricities from 0 to highest recorded eccentricity of debris in <1400 km orbit

Note: Output EVERY relevant simulation parameter (initial orbit and S/C data, burn start/stop angles, start epoch etc.) at the beginning of every simulation run [discuss with Max]

4.2.2. Reachability Enveloppe

RESULTING DIAGRAMS:

1. Visualize the absolute performance of the main design (Max), $e = 0$

- Axes: $y = \text{mass}$, $x = \text{SMA}$
- Graph: Use color gradients to display deorbit times (same time = same color)

2. Visualize the influence of eccentricity on deorbit times using the main design

- Axes: $y = \text{mass}$, $x = \text{SMA}$
- Select a fixed deorbit time (e.g. 2 years)
- Graph: Use color gradients to display eccentricities (same ecc = same color)

3. Visually compare the performances of the different designs (Max & 2-3 group designs), $e = 0$

- Axes: $y = \text{mass}$, $x = \text{SMA}$
- Select 1-2 fixed deorbit times (e.g. 2 years & 5 years)
- Graph: Draw lines of same deorbit time (selected above) for each of the different designs

Optional for group after 3. (decide if worth it)

4. Repeat 1. with all other chosen designs

NOTES:

For 1. & 4.:

(Deorbit time limited to 10 years (15? 20?))

-> <2 years of deorbiting takes 3-4 mins to simulate, amount of data is immense => limit maximum deorbit time?

-> At which deorbiting time does a feasible solution become unattractive? If 200 kg in 1000 km orbit is

deorbitable in 20 years, is it worth it? Better use chemical deorbiting = different mission in this case?

—> Agree on a meaningful limit on deorbit time

For all graphs/simulations:

Fuel mass limited by design -> if 27U standard is to be kept no matter which thruster configuration is

chosen, then smaller/more lightweight thrusters would result in more available space for fuel

—> Agree on a set percentage of margin for all designs (e.g. 50%) and determine maximum fuel from there?

-> For Max's design, fuel mass limited to 10 kg (thinking about increasing to 15 kg)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Fazit und Ausblick

Literaturverzeichnis

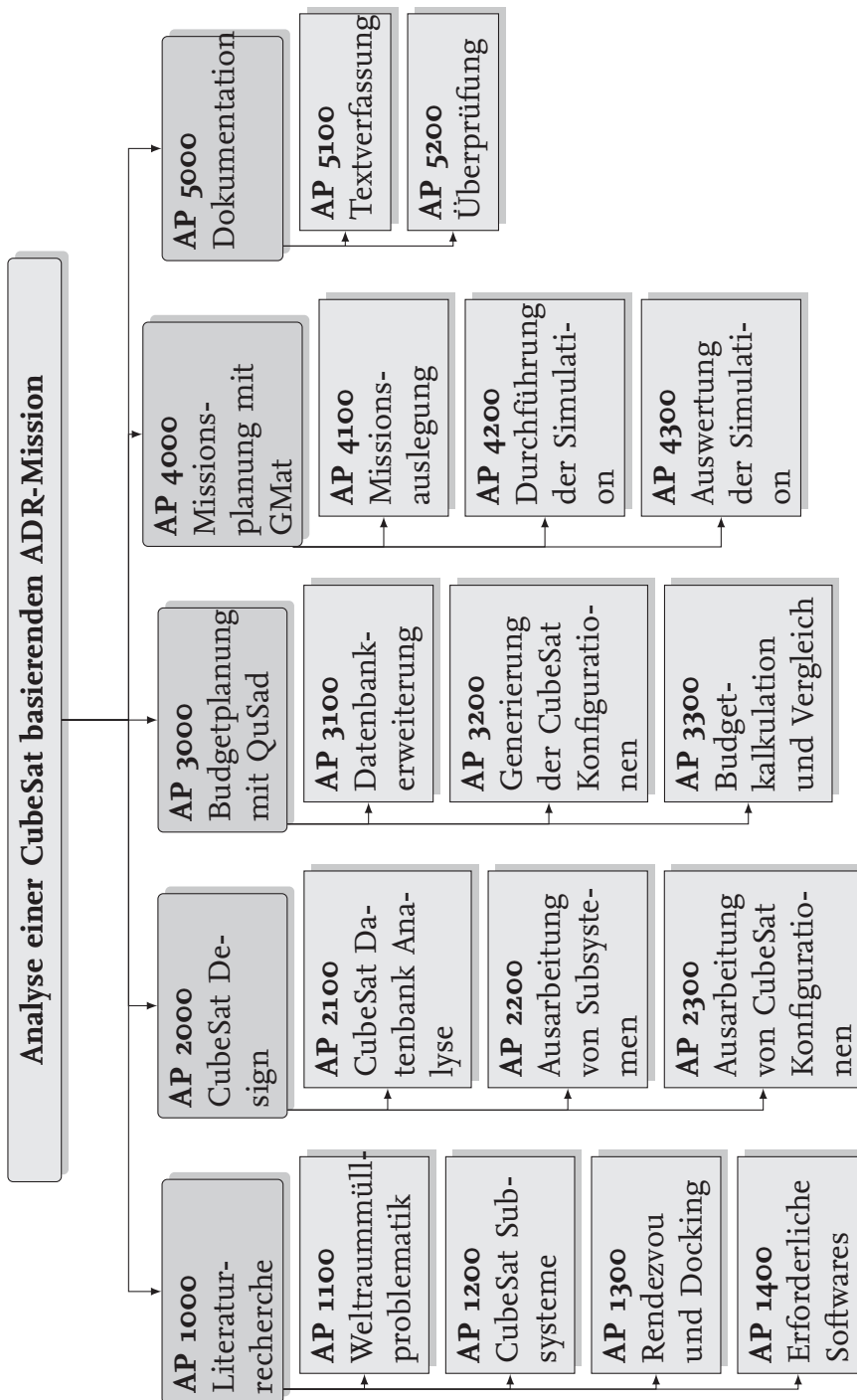
Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

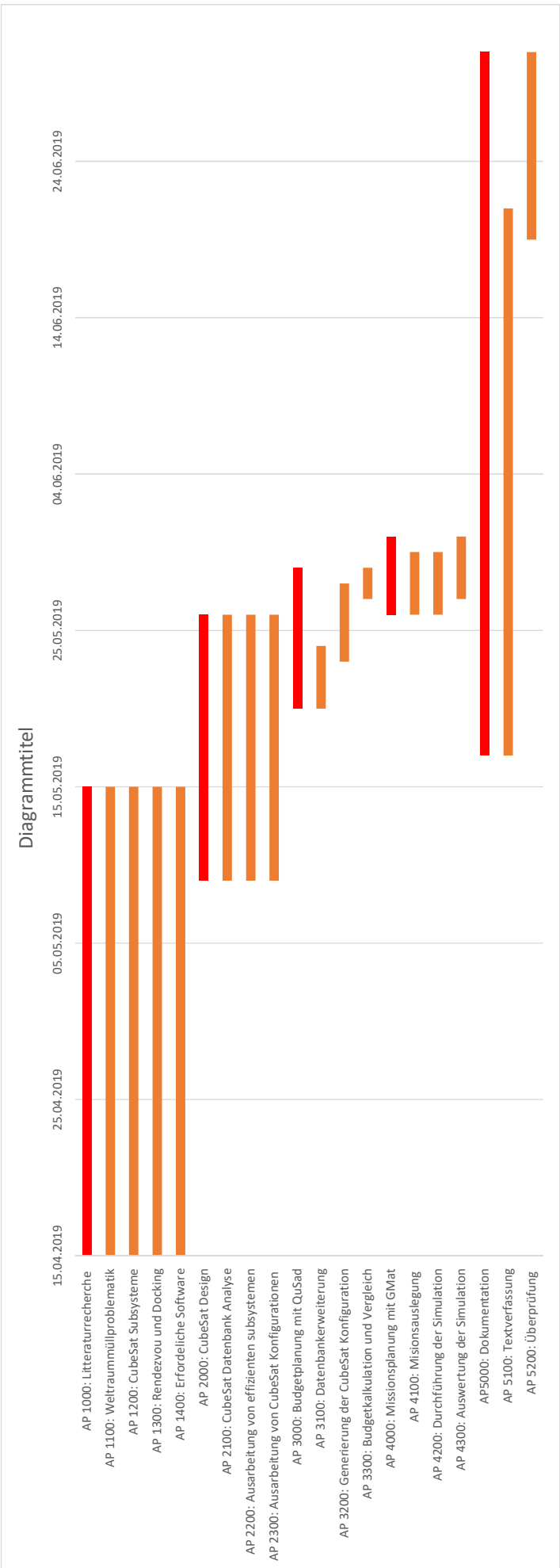
Symbolverzeichnis

A Projektmanagement

A.1. Work Breakdown Structure



A.2. Zeitplan



A.3. Work Package Description

		AP 1100
Titel	Weltraummüllproblematik	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Frederik Schäfer	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	15.04.2019	
Ende	15.05.2019	Dauer: 30 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, F. Schäfer, M. Strempel, O. Mouhaya, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Verstehen von Weltraummüll Entwicklung• Verstehen der resultierenden Risiken		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zu Weltraummüll und Megakonstellationen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur sichten• Ziele des Projekts definieren		

		AP 1200
Titel	CubeSat Subsysteme	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Frederik Schäfer	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	15.04.2019	
Ende	15.05.2019	Dauer: 30 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, F. Schäfer, M. Stempel, O. Mouhaya, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kennenlernen und Verstehen der CubeSat Subsysteme		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zu CubeSat Subsystemen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur sichten• Informationen über Subsysteme zusammenfassen		

		AP 1300
Titel	Rendezvous und Docking	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Frederik Schäfer	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	15.04.2019	
Ende	15.05.2019	Dauer: 30 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, F. Schäfer, M. Stempel, O. Mouhaya, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Kennenlernen und Verstehen von RDV und Docking Vorgängen mit nichtkooperativen Zielen		
Input: <ul style="list-style-type: none">• Literatur zu RDV und Docking mit nichtkooperativen Zielen		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 1200 für Verständnis der notwendigen Subsysteme• AP 1100 für Verständnis von Zielteilen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Literatur sichten		

		AP 1400
Titel	Software	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Frederik Schäfer	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	15.04.2019	
Ende	15.05.2019	Dauer: 30 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, F. Schäfer, M. Strempel, O. Mouhaya, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Software ist Einsatzbereit		
Input: <ul style="list-style-type: none">• QuSAD, GMAT, LaTeX• MatLab, Citavi, GitHub		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Installieren der Software• Einarbeitung in Programme		

		AP 2100
Titel	CubeSat Datenbank Analyse	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Florian Czorny	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	09.05.2019	
Ende	26.05.2019	Dauer: 17 Tage
Bearbeiter	V. Dietrich, F. Czorny	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Auseinandersetzung mit der Datenbank		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2200 Überblick über vorhandene Subsysteme• AP 2300 Überblick über vorhandene Subsysteme• AP 3100 Ermitteln fehlender Daten		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Kenntnisse über Inhalt der Datenbank erlangen• Überblick über vorhandene Subsysteme erlangen		

		AP 2200
Titel	Ausarbeitung von Subsystemen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Florian Czorny	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	09.05.2019	
Ende	26.05.2019	Dauer: 17 Tage
Bearbeiter	V. Dietrich, F. Czorny	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Auswahl qualifizierter Subsysteme		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 2100 Vorhandene Subsysteme in der Datenbank		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 2300 Vorauswahl für die Konfigurationen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Verwendbare Subsysteme identifizieren und vergleichen		

		AP 2300
Titel	Ausarbeitung von CubeSat Konfigurationen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Florian Czorny	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	09.05.2019	
Ende	26.05.2019	Dauer: 17 Tage
Bearbeiter	V. Dietrich, F. Czorny	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Zusammenstellung ausgewählter Konfigurationen		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 2200 Vorauswahl der Subsysteme		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 3100 Möglicherweise nicht alle Komponenten in der Datenbank• AP 3200 verfeinert erfasste Konfigurationen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Verschiedene Konfigurationen der ausgewählten Subsysteme erstellen		

		AP 3100
Titel	Datenbankerweiterung	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Valentina Dietrich	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	20.05.2019	
Ende	24.05.2019	Dauer: 4 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Erweiterung und Ergänzung der Datenbank		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP2100 liefert die zu erweiternde Datenbank		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 3200 Verwendbarkeit neuer Technologien		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Ergänzen fehlender Datensätze• Datenbank um neue Subsysteme erweitern		

		AP 3200
Titel	Generierung der CubeSat Konfigurationen	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Valentina Dietrich	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	23.05.2019	
Ende	28.05.2019	Dauer: 5 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, M. Stempel, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Fertigstellung von ausgewählten CubeSat Konfigurationen		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 3100 liefert Daten für ergänzte Subsysteme		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 3300 Verwendung der CubeSat Konfigurationen für die Budgetplanung• AP 4000 Verwendung der CubeSat Konfigurationen für die Simulationen		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Erweitern ausgewählter Konfigurationen um ergänzte Subsysteme		

		AP 3300
Titel	Budgetkalkulation und Vergleich	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Valentina Dietrich	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	27.05.2019	
Ende	29.05.2019	Dauer: 2 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, M.Strempel, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Erfassung der Vor- und Nachteile der erstellten Designs		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 3200 liefert Konfigurationen		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4100 verwendet die CubeSat Konfigurationen für die Missionsplanung		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Erstellung der Budgets für die einzelnen Konfigurationen• Gegenüberstellung der Budgets		

		AP 4100
Titel	Missionsauslegung	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Marc Strempel	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	26.05.2019	
Ende	30.05.2019	Dauer: 4 Tage
Bearbeiter	F. Schäfer, M. Strempel, O. Mouhaya	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">● Auslegung einer Beispielmision für den gegebenen CubeSat Entwurf		
Input: <ul style="list-style-type: none">● AP 3000 liefert ausgewählte CubeSat Konfigurationen		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">● AP 4200 führt die Simulation in GMAT durch		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">● Subsysteme in GMAT einpflegen● Missionsparameter in GMAT einpflegen		

		AP 4200
Titel	Durchführung der Simulation	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Marc Strempel	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	26.05.2019	
Ende	30.05.2019	Dauer: 4 Tage
Bearbeiter	F. Schäfer, M. Strempel, O. Mouhaya	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Erstellen von Simulationsdaten für verschiedene Konfigurationen		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 4100 liefert die notwendigen Ressourcen		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 4300 wertet die erstellten Daten aus		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Durchführen der Simulationen mit GMAT• Bereitstellen der Daten für die Auswertung		

		AP 4300
Titel	Auswertung der Simulation	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Marc Strempel	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	27.05.2019	
Ende	31.05.2019	Dauer: 4 Tage
Bearbeiter	F. Schäfer, M. Strempel, O. Mouhaya	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Bewertung der Simulationsdaten		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 3000 liefert die CubeSat Konfigurationen• AP 4200 liefert die Simulationsdaten		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Untersuchung der Simulationsdaten auf Durchführbarkeit und Zugänglichkeit		

		AP 5100
Titel	Textverfassung	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Oussama Mouhaya	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	17.05.2019	
Ende	21.06.2019	Dauer: 35 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, F. Schäfer, M. Stempel, O. Mouhaya, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Verfassung des Textes		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 1000• AP 2000• AP 3000• AP 4000		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 5200 Iterativer Prozess		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Text		

		AP 5200
Titel	Überprüfung	Seite: 1 von 1
Verantwortlicher	Oussama Mouhaya	Version: 1.1
		Datum: 15.04.2019
Beginn	19.06.2019	
Ende	01.07.2019	Dauer: 12 Tage
Bearbeiter	F. Czorny, F. Schäfer, M. Stempel, O. Mouhaya, V. Dietrich	
Ziele: <ul style="list-style-type: none">• Endfassung des Textes Erstellen		
Input: <ul style="list-style-type: none">• AP 5100		
Schnittstellen zu anderen APs: <ul style="list-style-type: none">• AP 5100 Rückkopplung zum Text		
Aufgaben: <ul style="list-style-type: none">• Überprüfung des Textes auf Formatierung, Rechtschreibung und Vollständigkeit		

