

YETE – Physikalisch Verteilte Steuerung im Weltraum Schlussbericht (FKZ 50RA1331)



**Informatik VII, Am Hubland, 97074 Würzburg
Informatik VIII, Josef-Martin-Weg 52/2, 97074 Würzburg
Zentrum für Telematik e.V., Magdalene-Schoch-Straße 5, 97074
Würzburg
Laufzeit: 01.08.2013 – 31.12.2016
Projektleiter: Prof. Dr. Sergio Montenegro, Prof. Dr. Klaus Schilling
Datum: 29.06.2017**

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung.....	2
1.1 Aufgabenstellung.....	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
1.4 Vorarbeiten/ Anknüpfungspunkte/ technischer Stand.....	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
2 Detaillierte Beschreibung.....	7
2.1 Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse.....	7
2.1.1 Satstudie SatXX.....	7
2.1.2 CAN Bus Subsystemvernetzung.....	8
2.1.3 Drahtlose Subsystemvernetzung.....	9
2.1.3.1 Dezentrale Kommunikationsarchitektur.....	9
2.1.3.2 HiL Kommunikationssimulator.....	11
Simulationskomponenten.....	11
HiTL Integration.....	14
2.1.4 Verteilte Regelung.....	15
2.1.4.1 Regelung über verlustbehaftete Kommunikationsstrecken.....	16
2.1.4.2 Zeitsynchronisation.....	17
2.1.5 Verteiltes Rechnen.....	19
2.1.6 Human-Machine Interface.....	20
2.1.6.1 Komponenten.....	20
2.1.6.2 Interaktion und Echtzeitperformanz.....	21
2.1.7 Hardware Demonstrator SMS.....	21
2.1.7.1 Aufbau.....	21
2.1.7.2 Systemmodell und Subsystemfehler tolerante Orientierungsregelung.....	22
2.1.8 Technologietransfer und weitere Yete-Konzepte.....	24
2.1.8.1 YETE-C Knoten.....	24
2.1.8.2 Automobil-Konzept.....	25
2.1.8.3 Yete-Modul Konnektor.....	25
2.1.8.4 Modularer-Yete-Roboterarm.....	27
2.1.9 Lessons learned und Ausblick.....	28
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis.....	28
2.3 Notwendigkeit/ Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	29
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit.....	29
2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....	30
2.6 Veröffentlichungen.....	30

1 Kurze Darstellung

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Aktivitäten und Ergebnisse des DLR-Projektes „YETE- Physikalisch verteilte Steuerung im Weltraum“. Das Projekt wurde im Verbund mit den Lehrstühlen Informatik VII und VIII der Universität Würzburg und dem

Zentrum Für Telematik e.V. durchgeführt. Die Projektleitung lag beim Lehrstuhl für Informatik VIII.

Ziel des Projektes war die Entwicklung bzw. Erprobung neuartiger Konzepte zur Regelung und Kommunikation modularer fraktionierter Weltraumfahrzeuge und der Demonstration dieser Konzepte anhand von Hardware Demonstratoren. Besonderer Fokus lag dabei auf verteilter Regelung, selbstorganisierender Kommunikation und verteiltem Rechnen.

1.1 Aufgabenstellung

Durch die Systembedingte enge Verknüpfung der einzelnen Schlüsseltechnologien (Kommunikation, verteilte Regelung, Kooperation/verteilttes Rechnen,...) des fraktionierten Weltraumfahrzeugskonzeptes fand eine Kompetenzenübergreifende und eng kooperative Bearbeitung der Aufgaben durch die einzelnen Partner statt. Dies erschwert eine strikte Aufgabentrennung, dennoch lassen sich die einzelnen Aufgabenfelder der Partner wie folgt angeben:

- ZfT:
 - Verteilte Regelung, Dedizierter Hardwaredemonstrator für die Regelungskonzepte, Hardware-in-the-Loop (HiL) Schnittstellen Entwicklung für Regelungssimulation
- Informatik VII:
 - Verteilte Regelung, Modulare/Hardwarefehlertolerante Regelung, Kommunikationsprotokolle, Modulare HiL Netzwerksimulation, Dezentrale robuste Zeitsynchronisation
- Informatik VIII:
 - Selbstorganisierende Kommunikationsprotokolle, Kommunikationshardware, Verteilttes Rechnen, Weltraumfahrzeughardwaredemonstrator des Gesamtkonzeptes

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

YETE war als Verbundprojekt durchaus von Vorgängerprojekten der einzelnen Projektpartner inspiriert und so konnte man auf einige bestehende Arbeiten zurückgreifen, u.a. Analysen zum Verhalten verschiedener Kommunikationsprotokolle im Bereich von Satellitenschwärmen, Strategien der dezentralen Task-Migration, sowie

auch verteilte Regelungsverfahren bspw. aus Diplom- und Masterarbeiten von Mitarbeitern, die direkt an YETE gearbeitet haben.

Das am Projekt beteiligte Personal gliederte sich wie folgt auf die einzelnen Partner auf:

- Zft: Eine Mitarbeiterstelle in Vollzeit sowie eine Stelle für eine wissenschaftliche Hilfskraft für die gesamte Projektdauer
- Informatik VII: Eine Mitarbeiterstelle in Vollzeit sowie eine Stelle für eine wissenschaftliche Hilfskraft für die gesamte Projektdauer
- Informatik VIII: Zwei Mitarbeiterstellen in Vollzeit sowie eine Stelle für eine wissenschaftliche Hilfskraft für die gesamte Projektdauer

Es waren darüber hinaus Mittel für den Aufbau eines Demonstrators eingeplant, um die entwickelten Ansätze auch auf realer Hardware zeigen zu können. Dies und die Einbindung von Studenten erwies sich als sehr sinnvoll.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das gesamte Projekt waren drei Jahre geplant. Start des Projektes war am 1. August 2013. Zu Beginn des Projektes wurden studienähnliche Arbeiten zu einem archetypischen Satelliten, dem s.g. SatXX durchgeführt um eine gemeinsame funktionale Basis für den finalen Hardwaredemonstrator zu definieren.

Parallel zur Studie wurde auch die geeignetste Hardware der Sensor-/Aktuator Subsystemknoten (STM32F4 Mikroprozessor basierend) und Berechnungsknoten (ARMv9 Quadcore basierend) identifiziert, sowie die initiale Intra-Satellit Kommunikationshardware (Bluetooth, WLAN) ausgewählt.

Anschließend begann das ZfT, an Regulationssimulationen zu arbeiten, zunächst noch auf einem einzelnen Knoten basierend. Nach etwa einem dreiviertel Jahr waren die notwendigen Grundstrukturen entwickelt und ein funktionierendes Simulationsmodell lag vor. Nun wurde damit begonnen, das in der Simulation lauffähige Konzept auf die reale Hardware zu übertragen.

Nach ungefähr einem Jahr war dies gelungen. Ebenso gab es zu diesem Zeitpunkt bereits erste Ansätze für die Kommunikation der Knoten untereinander. Studentische Hilfskräfte bauten einen einfachen Demonstrator, der im Laufe des Projektes immer wieder weiterentwickelt wurde und für Tests an den Algorithmen herangezogen werden konnte.

Schließlich wurde ein komplettes System bestehend aus zwei interagierenden Knoten gezeigt.

Im Anschluss an die SatXX Studie begann Informatik VII einzelne SatXX Subsystem- und Kommunikationskomponenten in der modularen Netzwerksimulationsumgebung Omnet++ zu replizieren. Dies war nach ca. einem Jahr fertiggestellt. Parallel dazu wurde zusammen mit dem ZfT ein paketverlusttoleranter verteilter Regelungsansatz entwickelt, der sowohl eine Intra-Sat Master-/Slave Konfiguration als auch eine Inter-Sat Leader-Follower Formation Regelung ermöglichen sollte. Im zweiten Projektjahr wurde die Netzwerksimulation um ein Dynamikframework erweitert, welches Lage- und Orbitsimulationen der kommunizierenden Satelliten ermöglicht. Zusätzlich wurde mit der Entwicklung einer transparenten Schnittstelle zwischen Simulation und realer Subsystem-/Knotenhardware begonnen, welche Mitte des dritten Projektjahres fertiggestellt wurde. Mitte des dritten Projektjahres bis zum Laufzeitende wurde eine paketverlusttolerante dezentrale Zeitsynchronisation realisiert sowie ein robuster Lageregler entworfen, welcher flexibel auf Aktuatorausfälle/Aktuatorerweiterungen zur Laufzeit reagieren kann.

Lehrstuhl VIII begann im Anschluss an die SatXX Studie mit der Übertragung eines starren kabelgebundenen Satellitenharnesses auf ein drahtlos gekoppeltes System. Hierzu wurden zuerst verschiedene terrestrische Low-Power Funkstandards (Bluetooth, Wlan, Ultra-Wide-Band,...) auf ihre Tauglichkeit für die Intra-Satellit Kommunikation anhand realer Knoten-hardware untersucht. Im zweiten Projektjahr wurde dann auf Basis der UWB Funktechnologie das dezentrale selbstorganisierende MAC-Funkprotokoll Capri entworfen, welches den Subsystemknoten eines/mehrerer Satelliten eine effiziente Kommunikation trotz einer sich dynamisch ändernden Netztopologie ermöglicht. Parallel wurde im zweiten Jahr mit der Entwicklung der verteilten Berechnung mittels eines Taskverteilungsansatzes begonnen, welcher sich sowohl über die Subsysteme/Knoten eines als auch mehrerer Satelliten erstreckt und robust gegenüber Knotenausfällen ist. Die Realisierung der verteilten Berechnung wurde dann Mitte des dritten Projektjahres erfolgreich abgeschlossen. Mit Abschluss der Taskverteilung begann die Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle/Grundstation für den Hardwaredemonstrator (SMS-Vehicle) des Gesamtkonzeptes. Dank des modular gehaltenen Interfaces konnte die Software auch nach fertigstellung der Grundfunktionalität gegen Ende des dritten Jahres parallel zur Weiterentwicklung des SMS-Vehicles um neue Parametervisualisierungen und Interaktionsmöglichkeiten erweitert werden. Von Beginn des zweiten Jahres bis Ende des Projektes wurde zusätzlich parallel mit dem Fortschreiten der Forschungen und Entwicklungen aller Partner der Gesamtkonzept Hardwaredemonstrator "SMS-Vehicle" sukzessive mit Hilfe von studentischen Hilfskräften entwickelt und aufgebaut.

Das ZfT, LS VII und LS VIII konnten das Vorhaben kostenneutral bis zum 31. Dezember 2016 verlängern, woraufhin es auch planmäßig abgeschlossen wurde. Die Abschlusspräsentation fand ebenso Ende des Jahres 2016 zusammen mit allen Projektpartnern statt. Die Funktionalität des Gesamtkonzeptdemonstrators SMS-Vehicle

wurde zusätzlich Anfang 2017 auf dem Testgelände des LS VIII erfolgreich den Projektträgern demonstriert.

1.4 Vorarbeiten/ Anknüpfungspunkte/ technischer Stand

Das ZfT sowie der Lehrstuhl VII konnten auf bereits vorliegende Erfahrungen aus dem Projekt BayKoSM (Bayerische Kompetenzen für Schwarm-Missionen) zurückgreifen, um schnelle Fortschritte bei der zu erwartenden Kommunikationscharakteristik und die Implikationen auf die Regelung zu erzielen. In diesem Projekt wurden bereits sehr ähnliche Szenarien mittels Software-Simulation realisiert.

Im Bereich der Regelungstechnik für Weltraumfahrzeuge im Nahbereich waren ebenfalls Vorkenntnisse vorhanden aus Projekten wie FORROST, wo es um On-Orbit Servicing ging.

Lehrstuhl VIII konnte im Bereich robustes verteiltes Rechnen auf seine im Vidana Projekt gewonnene Erfahrung aufbauen. Zusätzlich war die am LS VIII weiterentwickelte Middleware für verteilte Subsystemknoten RODOS eine essentielle Grundlage aller Arbeiten an realer Yete-Hardware wodurch die existierende In-House Expertise der Middleware bei LS VIII einen entscheidenden zeitlichen Vorteil bei der Realisierung der einzelnen verteilten Systemaspekte brachte. Durch die Mitarbeit von LS VIII an vielen Satellitenmissionen insbesondere im Bereich der Onboard-Software besteht ein weitreichender Einblick sowohl in die anfallenden Aufgaben in diesen Systemen, als auch in die verwendeten Kommunikationsprotokolle. Dies erlaubte insbesondere zu Beginn des Projekts und im Verlauf der SATXX Studie die auftretenden, wesentlichen Anforderungen schnell zu identifizieren.

Das primäre Dokumentationsmedium innerhalb des Projektes stellte ein projekt-internes Wiki dar, welches von den Partnern regelmäßig gepflegt wurde. Zusätzlich wurde der Entwicklungsfortschritt in einem SVN Code-Repository festgehalten, auf das alle Projektpartner zugriff hatten.

Eine Detaillierte Auflistung der verwendeten Grundlagenliteratur lässt sich der Bibliographie der jeweiligen Projekt-Publikationen entnehmen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten im Rahmen des Projektes fanden in Kooperation mit den beiden Informatiklehrstühlen VII, VIII der Universität Würzburg und dem Zentrum für Telematik e.V. statt:

- Lehrstuhl für Informatik VII: Robotik und Telematik (Prof. Schilling)
- Lehrstuhl für Informatik VIII: Luft- und Raumfahrttechnik (Prof. Montenegro)
- Zentrum für Telematik e.V. (ZfT)

Die Projektleitung lag beim Lehrstuhl für Informatik VIII.

Die Zusammenarbeit und der Wissenstransfer zwischen den Partnern wurde während der Projektlaufzeit durch alle zwei Wochen stattfindende Progressmeetings des gesamten Teams sowie bedarfsorientierte Treffen der partnerübergreifenden thematischen Subgruppen gefördert.

2 Detaillierte Beschreibung

2.1 Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse

2.1.1 Satstudie SatXX

Um eine Idee zu bekommen, was das verteilte System am Ende erreichen soll und welche Anforderungen an es gestellt werden, wurde zunächst ein virtuelles Satellitensystem zusammengestellt. Basierend auf bekannten Raumfahrzeugen wurden die Schlüsselkomponenten und vorherrschenden Kommunikationsprotokolle identifiziert. Darauf aufbauend wurde ein Satellitensystem SATXX entworfen, das entsprechend der erworbenen Erkenntnisse ein Referenzsatelliten mit entsprechend typischer Aktuatorik und Sensorik darstellt (siehe Abbildung 1). Dieser Satellit wurde nicht in Hardware umgesetzt, sondern diente als Bezugspunkt für alle späteren Arbeiten. Ein Ausschnitt des Satelliten findet sich dann auch im Demonstrator am Ende des Projektes wieder.

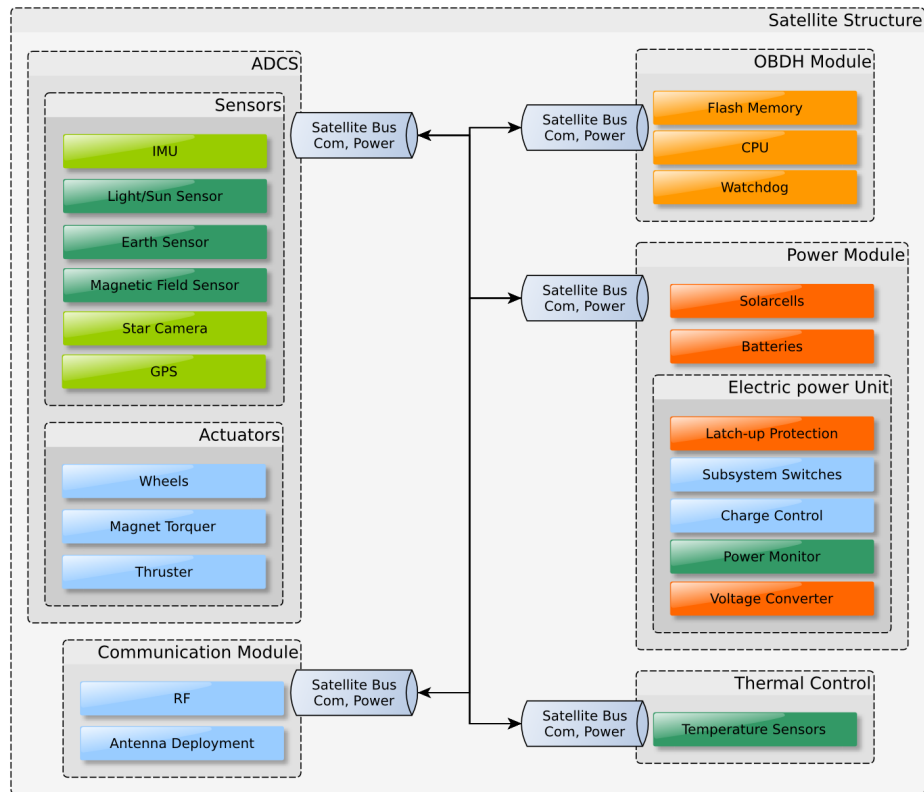


Abbildung 1: Struktur des Referenz Satelliten SATXX.

2.1.2 CAN Bus Subsystemvernetzung

Zunächst wurde in Anlehnung an den Referenzsatelliten SATXX ein prototypisches Satellitensystem aufgebaut, das traditionelle Kabelverbindungen zu Kommunikation nutzt. Als Kommunikationskanal wurde hier CAN (Controller Area Network) verwendet, das insgesamt in Raumfahrtssystemen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Auf Grund der Multi-Point-Bus-Architektur erlaubte dies später einen einfacheren Übergang zu einer kabellosen Kommunikationsarchitektur, bei der sich alle Teilnehmer einen Übertragungskanal teilen.

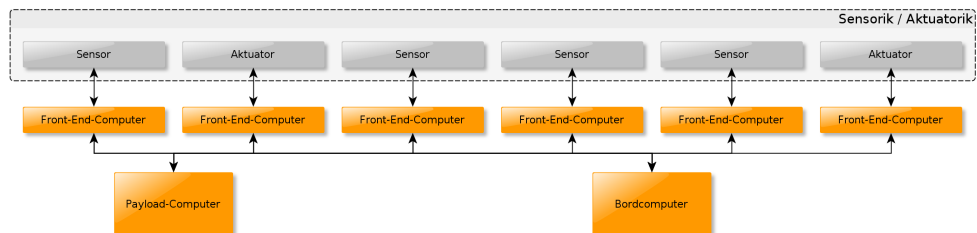


Abbildung 2: Über CAN-Bus vernetzte Satellitenarchitektur.

2.1.3 Drahtlose Subsystemvernetzung

Das verkabelte Satellitensystem wurde anschließend auf kabellose Kommunikation umgestellt. Hier kamen nach einiger Rechercharbeit zunächst drei verschiedene Systeme in Frage. Zum einen Wifi und Bluetooth, zum anderen Ultrawideband. Um die verschiedenen Technologien zu testen wurde eine Platine entwickelt, die Schnittstellen zu den verschiedenen Funkstandards zur Verfügung stellt und gleichzeitig die entsprechende Konnektivität für Sensorik und Aktuatorik bereit hält.

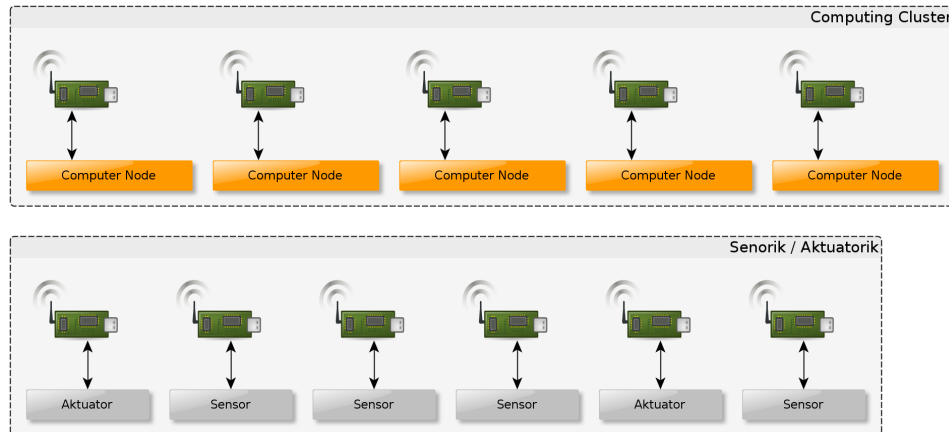


Abbildung 3: Kabellos vernetzte Satellitenarchitektur.

2.1.3.1 Dezentrale Kommunikationsarchitektur

Die verfügbaren Module für Ultrawideband-Kommunikation bringen noch keine Protokolle über dem physikalischen Layer des Funkchips mit sich. Es wird zwar generell die Integrität der einzelnen Datenpakete geprüft, der Zugriff auf das Medium wird aber nicht weiter bezüglich Kollisionsvermeidung geregelt. Daher wurde im Rahmen von YETE ein Protokoll für Ultrawideband entwickelt, das als MAC-Layer (siehe OSI 7-Schichten-Modell) auf dem physikalischen Layer der Funkchips aufsetzt. Es stellt sicher, dass jeder Netzwerkteilnehmer ein entsprechendes Zeitslot zugewiesen bekommt, innerhalb dessen er kollisionsfrei senden kann. Es wird ein dynamischer Aufbau des Netzwerks ermöglicht, bei dem sich Knoten flexibel ein- und ausklinken können.

Die Initialisierung der Protokolls läuft dabei über CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance), während, sobald das Netzwerk aufgebaut ist, ein TDMA (Time Division Multiple Access) Ansatz gewählt wurde. Somit wird jedem angemeldeten Knoten in Abhängigkeit der Gesamtknotenanzahl eine feste Bandbreite garantiert.

In Abbildung 4 sind die verschiedenen Komponenten des Protokolls dargestellt. Ist die erste Initialisierung abgeschlossen gibt es zwei Betriebszustände. Zum einen den normalen Zustand, in dem Datenpakete innerhalb der zugewiesenen Zeitfenster ausgetauscht werden, zum anderen einen Synchronisationsmodus der dem Zuweisen

der Zeitfenster an die einzelnen Knoten dient. Tritt kein Paketverlust auf und ändern sich die beteiligten Knoten nicht, wird der normale Modus nicht verlassen. Im tatsächlichen Betrieb ist mit Paketverlust über die Funkverbindung allerdings immer zu rechnen.

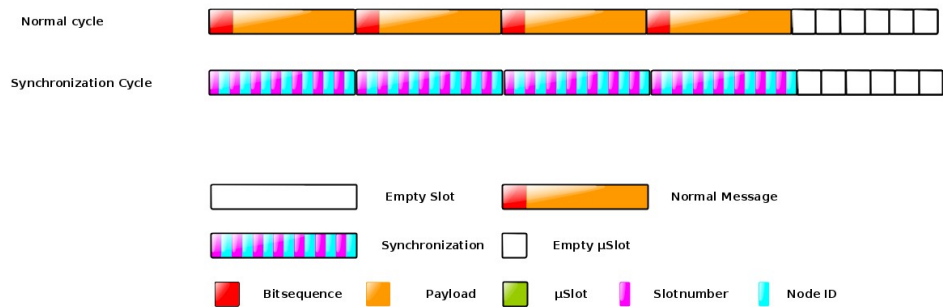


Abbildung 4: Aufbau des Funkprotokolls.

In Abbildung 5 ist exemplarisch der Verbindungsaufbau eines neuen Knoten zu sehen. Zunächst meldet er sich im Normalbetrieb in einem Zeitfenster zwischen den Datenpaketen, dass zu Neuanmeldung vorgesehen ist. Anschließend wechselt das System in die Synchronisationsmodus in dem dem neuen Knoten ein Zeitfenster zugewiesen wird und gleichzeitig sichergestellt wird, dass alle Knoten mit der gleichen Datenbasis bezüglich der Zeiteinteilung arbeiten. Ist dieser Vorgang abgeschlossen wird wieder in den normalen Datenbetrieb gewechselt.

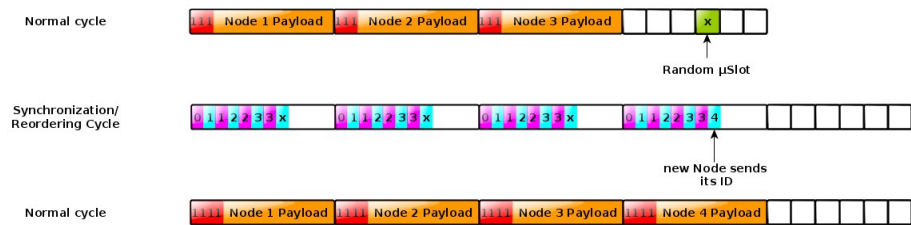


Abbildung 5: Ein neuer Knoten verbindet sich.

Es wurden umfangreiche Tests durchgeführt um Datendurchsatz, Flexibilität und Robustheit des Protokolls zu erproben. Exemplarisch sei hier in Abbildung 6 nur der Datendurchsatz in Paketen pro Minute gezeigt.

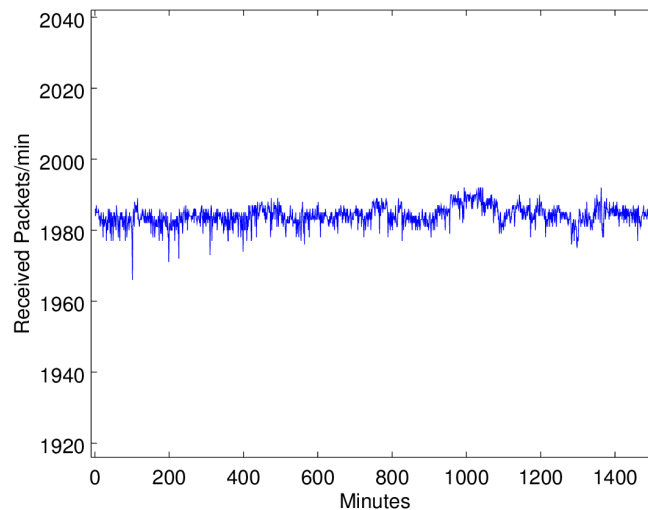


Abbildung 6: Datendurchsatz pro Minute.

Weitere Details zum Protokoll finden sich unter anderem im Paper *“Collision Free Protocol for Ultrawideband Links in Distributed Satellite Avionics”* das im Rahmen der 4S Konferenz 2016 in Malta veröffentlicht wurde (siehe *Veröffentlichungen*).

2.1.3.2 HiL Kommunikationssimulator

Einen integralen Bestandteil des fraktionierten kooperativen Satellitensystems stellt die Inter-Satelliten und Intra-Satelliten Kommunikation dar. Die Charakteristik der Übertragungsstrecke (z.B. Delays, Paketverluste, Bitfehler, ...) als auch der Protokolle (Routing, MAC, ...) übt einen vielfältigen Einfluss auf die Performanz der einzelnen Subsystemkomponenten, die verteilte Regelung sowie die verschiedenen Kooperationsaspekte, bspw. die Intra-/Inter-Satelliten Taskverteilung, aus. Um die Effekte der Kommunikation auf das verteilte System unter kontrollierten Bedingungen gezielt testen zu können wurde eine Hardware-In-the-Loop Simulation, basierend auf der modularen Netzwerksimulationsumgebung Omnet++, geschaffen. Zielsetzung hierbei war die Möglichkeit reale Kommunikationshardware einzelner Yete Knoten transparent durch die Simulation substituieren zu können und so die Netztopologie und Übertragungscharakteristik zwischen den Yete-Knoten für Tests dynamisch ändern zu können ohne den Rest des Systems groß anpassen zu müssen.

Simulationskomponenten

Im ersten Schritt wurden die für die Kommunikation relevanten Komponenten der Yete-Knoten als Module innerhalb der Simulationsumgebung repliziert. In Abbildung 7 ist eine Repräsentation eines Yete-Satelliten innerhalb der Simulation dargestellt. Dieser enthält drei Kommunikationslinkmodule (sat_intralink: Intra-Satelliten Link, sat_interlink: Inter-Satelliten Link und sat_mcclink: Satellit zu Groundstation Link) und drei Gateway-

Module, sowie einen Satellite-state, welcher die aktuelle Position und Orientierung des Satelliten innerhalb der Simulation kodiert.

Die Kommunikationslinkmodule simulieren die Charakteristik des Funk-backends und der Übertragungstrecke von Intra-Satellit, Inter-Satellit und Satellit zu Bodenstation Verbindungen. Dabei werden je nach Art der Übertragungstrecke unterschiedliche Übertragungscharakteristika wie Bandbreite, Bitfehlerrate und Paketverlustrate sowie dynamische Effekte wie Freiraumdämpfung in Abhängigkeit der Distanz der Kommunikationspartner simuliert. Zusätzlich kann die Variation der Netztopologien der verschiedenen Linktypen statisch festgelegt oder zur Laufzeit anhand der Position der einzelnen Yete-Knoten und der Bodenstationen angepasst werden.

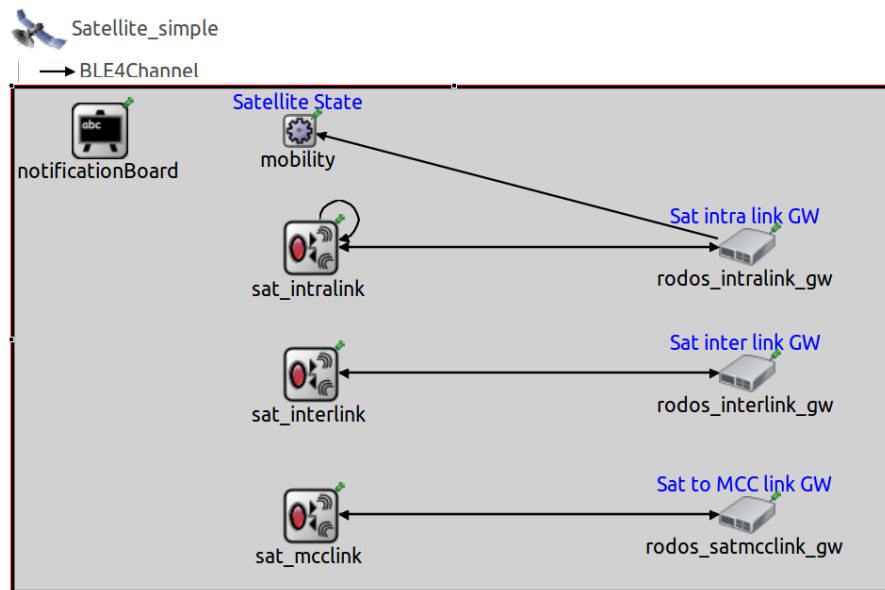


Abbildung 7: Repräsentation eines Yete-Satelliten als Modul innerhalb der Netzwerksimulation Omnet++.

Als ein weiteres Element innerhalb des Yete-Knoten-Netzes wurde auch die Kommunikationsseite der Bodenstation innerhalb der Simulation realisiert, was in Abbildung 8 gezeigt ist. Hier wurde ein vorhandenes Internet-Host-Modul innerhalb von Omnet++ um die Funktionalität erweitert, bei Sichtverbindung mit einem Satelliten-Modul kommunizieren zu können (mcc_sat_link). So lassen sich nicht nur Bodenstationskontakte sondern auch eventuell vorhandene Bodenstationsnetzwerke innerhalb des Yete-Systems simulieren.

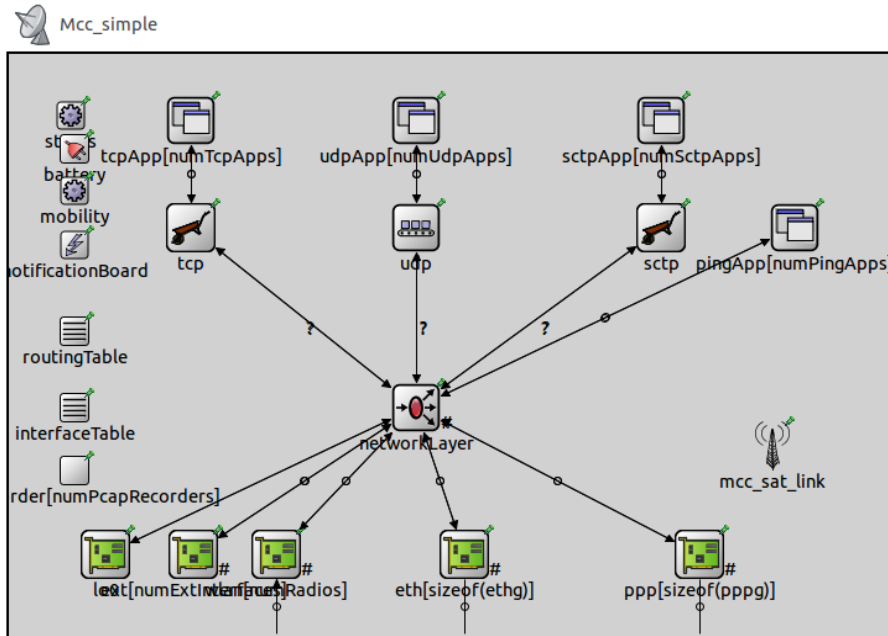


Abbildung 8: Mission-Control-Center Modul innerhalb der Simulationsumgebung, mit dem mcc_sat_link als Verbindung zu den Satelliten in Reichweite und den restlichen Simulationsmodulen, welche ein Bodenstationsnetzwerk simulieren.

Die Position und Orientierung der einzelnen Yete-Knoten zu jedem Simulationszeitpunkt kann einen wichtigen Einfluss auf die Verbindungscharakteristik der Knoten und somit auch auf die Qualität und Aussagekraft der Simulationsergebnisse haben, daher ist ein häufiges Update dieser Knoten-Zustände wünschenswert. Da jedes externe, also von direkt von der Hardware übermittelte Update der Knoten-Zustände einen unerwünschten Overhead auf der Test-Kommunikationstrecke erzeugt, wurde entschieden innerhalb von Omnet++ einen Dynamiksimulator zu implementieren. Dieser wird in regelmäßigen Zeitintervallen von der Knoten-Hardware mit dem aktuellen Zustand des Knotens (z.B. Position und Orientierung) upgedated und interpoliert zu allen anderen Zeitpunkten den Zustand des Knotens für die Simulation. Für die Orbitsimulation der Knoten eines Yete-Satelliten wurde ein Runge-Kutta Integrationsverfahren 4. Ordnung mit einem Orbitmodell inklusive J2-Störeinfluss eingesetzt.

In Abbildung 9 ist die Visualisierung der Position und Bodenkontaktradien einer Beispiel Yete-Satelliten-Formation innerhalb der Kommunikationssimulation zu sehen.

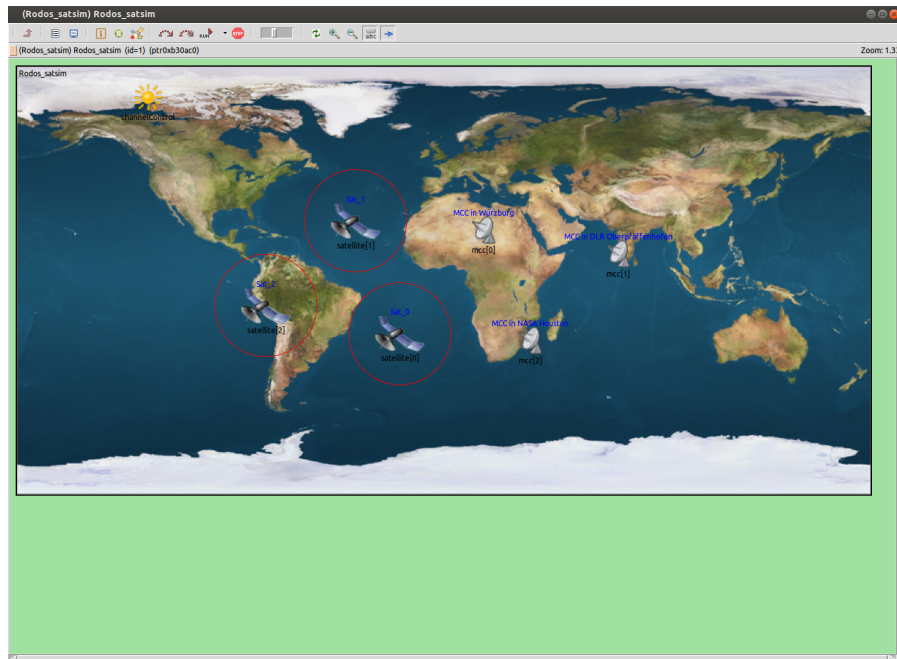


Abbildung 9: Bewegungs- und Kontaktvisualisierung mehrerer Yete-Satelliten und Bodenstationen innerhalb des Omnet++/OS3 Kommunikationssimulators.

HitL Integration

Im letzten Schritt der Kommunikationssimulationsintegration in das Yete-System wurde eine Schnittstelle zwischen der Simulation und den Hardware-Yete-Knoten geschaffen, die s.g. "Gateways" zu sehen als Modul auf der rechten Seite des Satelliten-Moduls in Abbildung 7.

Die "Gateway" Komponente innerhalb der Simulation wurde dabei so entwickelt, dass Yete-Hardware-Knoten über eine Vielzahl von Hardwareschnittstellen (RS232, CAN, TCP/IP, ...) ihre Kommunikation asynchron in die Simulation einspeisen können um mit anderen Yete Knoten zu kommunizieren. Dadurch ersetzt die Simulationsumgebung die realen Hardwarekommunikationsschnittstellen der Yete-Knoten (s.h. Abbildung 10) und es lassen sich somit wie erwähnt beliebige Netztopologien und Übertragungscharakteristika zwischen den Hardware-Knoten festlegen. Der durch die Simulation eingeführte Overhead auf die Knotenkommunikation in Form von Verzögerung ist in Abbildung 11 für eine Übertragung von 4687 Paketen (à 1023 Bytes) zwischen zwei Yete-Knoten dargestellt. Die Verteilung zeigt, dass über 88% der Pakete eine Verzögerung durch die Simulation von weniger als 0,12 ms aufweisen. Gemessen an der durchschnittlichen Verzögerung der Kommunikation durch die Verarbeitung innerhalb der Hardware-Knoten im Bereich von mehreren Millisekunden ist dies ein akzeptabler Overhead für die HitL Kommunikationssimulation.

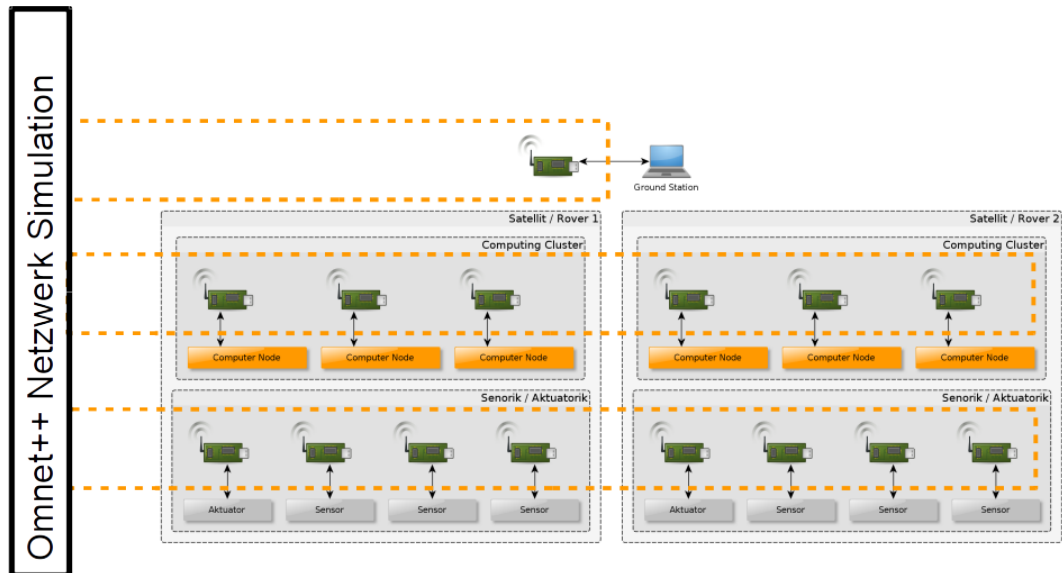


Abbildung 10: HitL Integration des Omnet++ Netzwerksimulators durch Substitution der Hardwarekommunikationsschnittstellen der Yete-Hardware-Knoten.

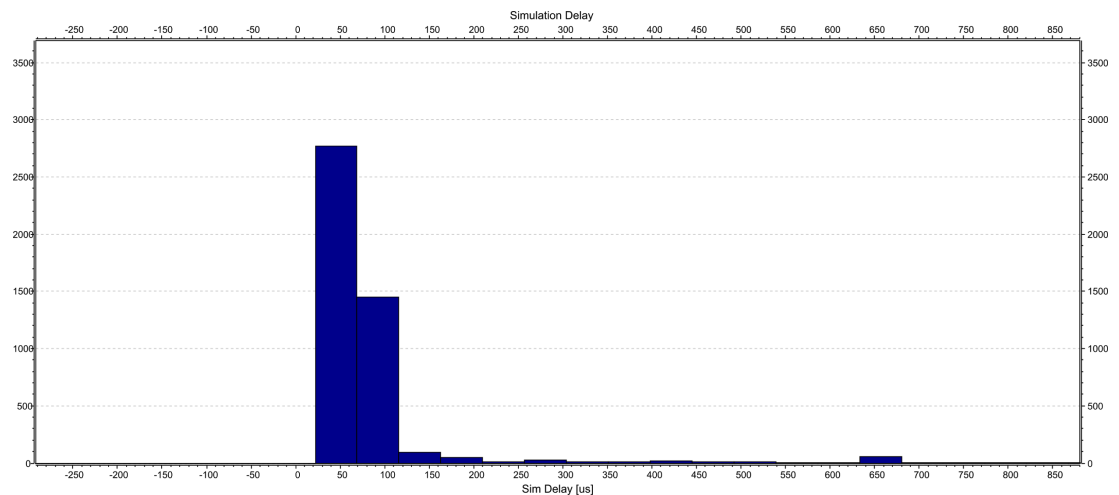


Abbildung 11: Verzögerung bei der Übertragung von 4687 Datenpaketen (1023 Byte pro Paket) zwischen zwei Yete-Hardware Knoten mit der Simulation als Verbindungsschnittstelle → Mehr als 88% aller Pakete haben eine Verzögerung von weniger als 0,12 ms.

2.1.4 Verteilte Regelung

Die verteilte Regelung von mehreren Yete-Knoten stellt einen Kernaspekt des Yete-Systems dar. Da Aktuatoren, Sensoren und Recheneinheiten eines Yete-Hardware Systems nur lose über Funkverbindungen gekoppelt sind muss eine Regelung eines

solchen Systems in der Lage sein trotz der speziellen Verbindungscharakteristiken die Stabilität des Gesamtsystems zu garantieren. Die Maßgeblichen Verbindungsparameter die hier zum Tragen kommen sind Zeitverzögerungen und Paketverluste. Da Verzögerungen aufgrund der Signallaufzeit im Fall von Yete, wo alle in die Regelungsschleife involvierten Knoten sich relativ nahe beieinander befinden, vernachlässigbar sind, waren vor allem Paketverluste, bspw. Aufgrund von gegenseitiger Interferenz oder Bitfehlern im verteilten Reglerdesign zu berücksichtigen. Weiterhin wurden vor allem Paketverluste in der Strecke von Sensor zum Regler betrachtet, da der Effekt eines Paketverlustes in der Strecke vom Regler zum Aktuator im Normalfall direkt von der Stabilitätsbedingung des ungestörten Regelkreises abgefangen wird.

2.1.4.1 Regelung über verlustbehaftete Kommunikationsstrecken

Das Modell der verteilten Regelstrecke, welches als Basis des vom ZfT und LS VII entwickelten verteilten Reglers dient ist in Abbildung 12 abgebildet. Im Modell kann auf der Kommunikationsstrecke von der Sensorik zum Regler mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit p ein Datenverlust auftreten. Als Regleransatz wurde als ein parametrisiertes lineares System entworfen, welches im Fall eines Paketverlustes in einen anderen internen Zustand wechselt und das System auf Basis des letzten bekannten Wertes weiter regelt (ein s.g. Switching-Controller). Es kann für einen solchen Regler gezeigt werden, dass er das verteilte Regelungssystem bis zu einer Paketverlustwahrscheinlichkeit p stabil regelt (Mean-Square-Stability). Zusätzlich zur switching charakteristik wurde für die Reglerparameter ein H-Infinity Designansatz verwendet, wodurch der entwickelte Regler bezogen auf äußere Störeinflüsse ein möglichst robustes Regelverhalten an den Tag legt.

Die Performanz des entwickelten Reglers konnte erfolgreich für ein einzelnes Sensor-Aktuator-Regler System des am ZfT entwickelten Regelungshardware-demonstrator gezeigt werden (s.h. Abbildung 14), welcher die Dynamik und Interaktion eines Yete-Sensor-Aktuator Systems abbildet.

Mit Hilfe des entwickelten

Regelungsansatzes lassen sich einzelne Yete-Sensor-Aktuator-Systeme, wie z.B. die Orientierung eines Yete-Satelliten mittels Reaktionsrädern, regeln. Darüber hinaus sollte

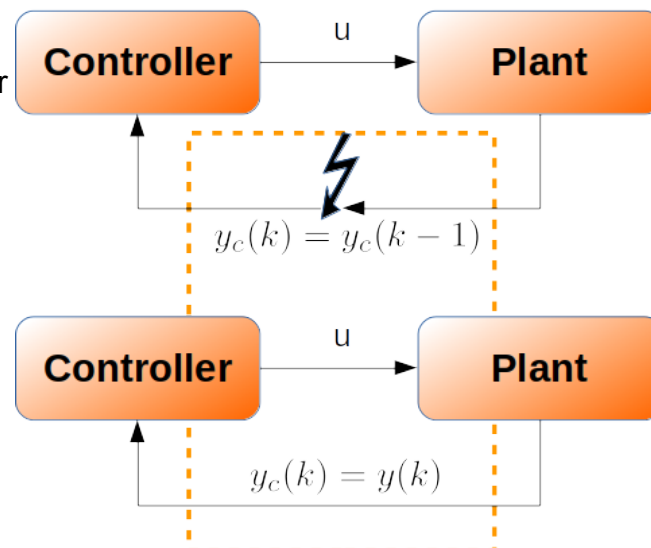


Abbildung 12: Verteiltes Regelungsmodell, bei dem in der Kommunikationsstrecke von der Sensorik zum Regler ein zufälliger Paketverlust auftreten kann.

auch ein weiterer Aspekt des Yete-Konzepts mit verteilter Regelung realisiert werden, nämlich die Möglichkeit beim Ausfall der Rechenknoten eines Satelliten (im folgenden als Slave bezeichnet) dessen Sensoren und Aktuatoren über die Funkschnittstelle weiterhin verwenden zu können und ihn dadurch von einem anderen Yete-System (im folgenden als Master bezeichnet) mit funktionierenden Rechen-Knoten weiterhin regeln zu können. Ein Beispielszenario hierfür wäre eine Formation aus zwei oder mehreren Yete-Satelliten. Daher wurde vom ZfT und LS VII im folgenden eine Master-Slave Konfiguration wie in Abbildung 13 zu sehen als Modell für ein weiteres Reglerdesign verwendet. In diesem Modell läuft der Regler auf einem der Rechenknoten des Master-Systems und regelt dieses direkt. Zusätzlich muss der Regler aber auch ein Slave-System mit Paketverlusten im Sensor-Feedback vom Slave zum Master regeln. Zusätzlich sind sowohl Slave- als auch das Master-System verschiedenen Störeinflüssen (d_s , d_m) ausgesetzt. Für ein solches System wurde der bereits für ein Einzelsystem entwickelte robuste Regler um die Zustände des Slave-Systems erweitert und es konnte in der Theorie wiederum gezeigt werden, dass ein solch erweiterter Regler das Gesamtsystem trotz Paketverlusten zuverlässig stabilisieren kann. Im Anschluss an initiale Simulationen wurde der verteilte Regelungsansatz in der Master-Slave Konfiguration an dem vom ZfT entwickelten Regelungshardware-demonstrator (Abbildung 14) mit einer Paketverlustrate von $p=32\%$ validiert. Die Resultate sind in Abbildung 15 zu sehen. Eine Paketverlustrate von 32% stellt ein extrem Beispiel für eine stark gestörte Verbindung zwischen Master und Slave System dar, dennoch lässt sich aus den Ergebnissen entnehmen, dass der verteilte Regler es schafft den Slave zuverlässig auf einer vorgegebenen Solltrajektorie zu halten. Weiterhin ist deutlich zu sehen, dass der Regelungsaufwand für das Slave-System aufgrund der Paketverluste deutlich höher als für das Master-System ist.

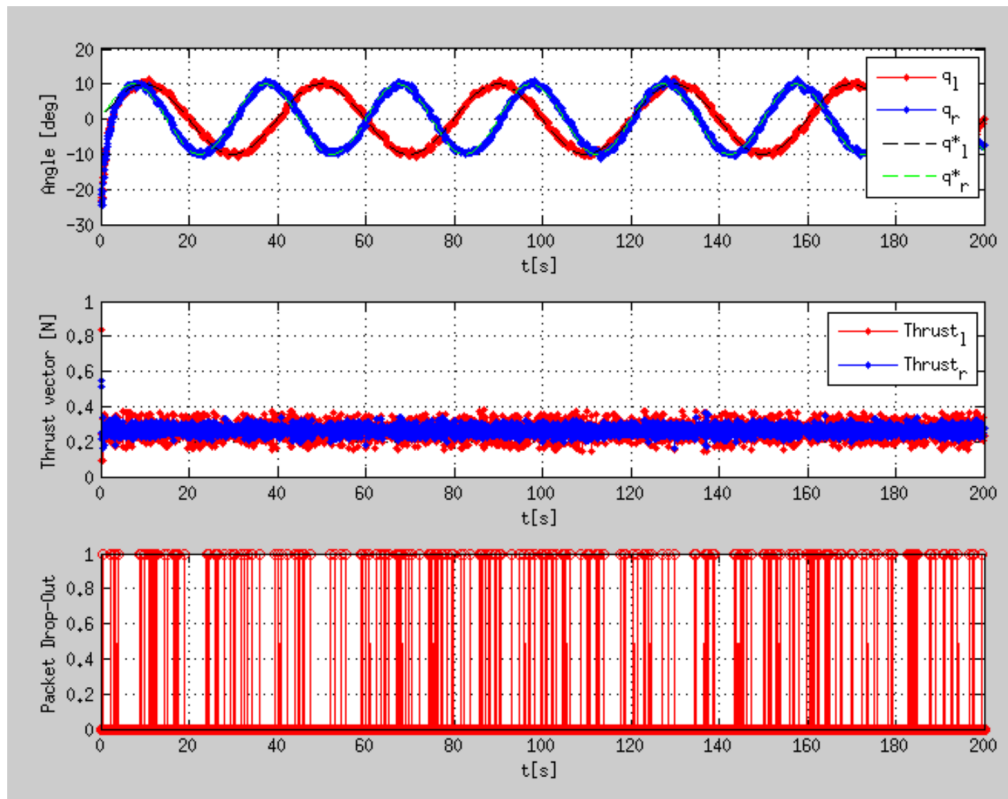


Abbildung 15: Hardwaretest des verteilten Reglers an einer Master (blau) - Slave (rot) Rotor-Pendel Konfiguration mit einer Paketverlustrate von $p=32\%$ im Sensorfeedback des Slaves. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Soll- Winkel des Master und Slave Pendels und die durchgezogenen Linien die Real-Winkel. Weiterhin ist der benötigte Kontrollaufwand und die jeweils auftretenden Paketverluste (Packet Drop-Out = 1) zu sehen.

Weitere entwickelte verteilte Regelungsansätze und weitere Details zum Regelungshardwaredemonstrator des ZfT sind auch im ZfT Schlussbericht unter Abschnitt II.1. zu finden.

2.1.4.2 Zeitsynchronisation

Damit unter anderem Sensordaten von verschiedenen verteilten Yete-Knoten in Beziehung gesetzt und genutzt werden können ist es nötig sie mit einem innerhalb des Yete-System gültigen Zeitstempel zu versehen. Eine Grundvoraussetzung dafür ist allerdings, dass die einzelnen Yete-Knoten eine gemeinsame Zeitbasis besitzen, d.h. Sie müssen zeitsynchron sein. Um dies auch ohne GPS innerhalb eines so verteilten dezentralen Systems wie dem Yete-System zu realisieren wurde von LS VII ein auf Maximum-Value-Konsensus basiertes Zeitsynchronisationsverfahren für Yete verwendet. Dieses Verfahren bietet die Vorteile, dass es komplett dezentral ist, es sowohl den Zeitphasenverschiebung als auch den Uhrendrift zwischen den Knoten

ausgleicht und es selbst unter hohen Paketverlustraten zwischen den Yete-Knoten noch auf eine gemeinsame Zeitbasis konvergiert.

Die schnelle Konvergenz des Verfahrens ohne Paketverluste ist in Abbildung 16 und für eine hohe Paketverlustrate von 50% in Abbildung 17 zu sehen.

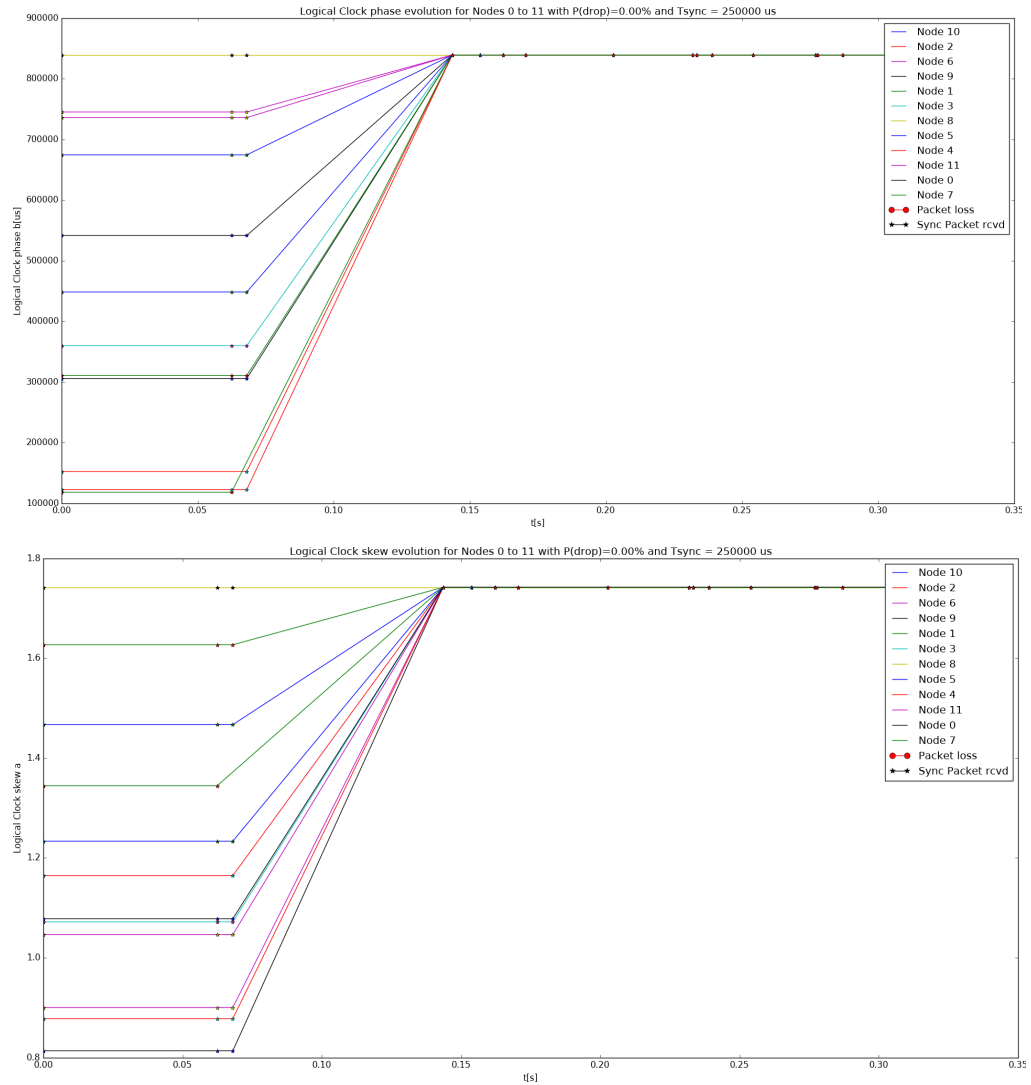


Abbildung 16: Uhren Phasen- und Driftsynchronisation von 10 Yete-Knoten mit einem Austauschintervall von Zeitsynchronisationsdaten von 250 ms und einer Paketverlustrate von 0%.

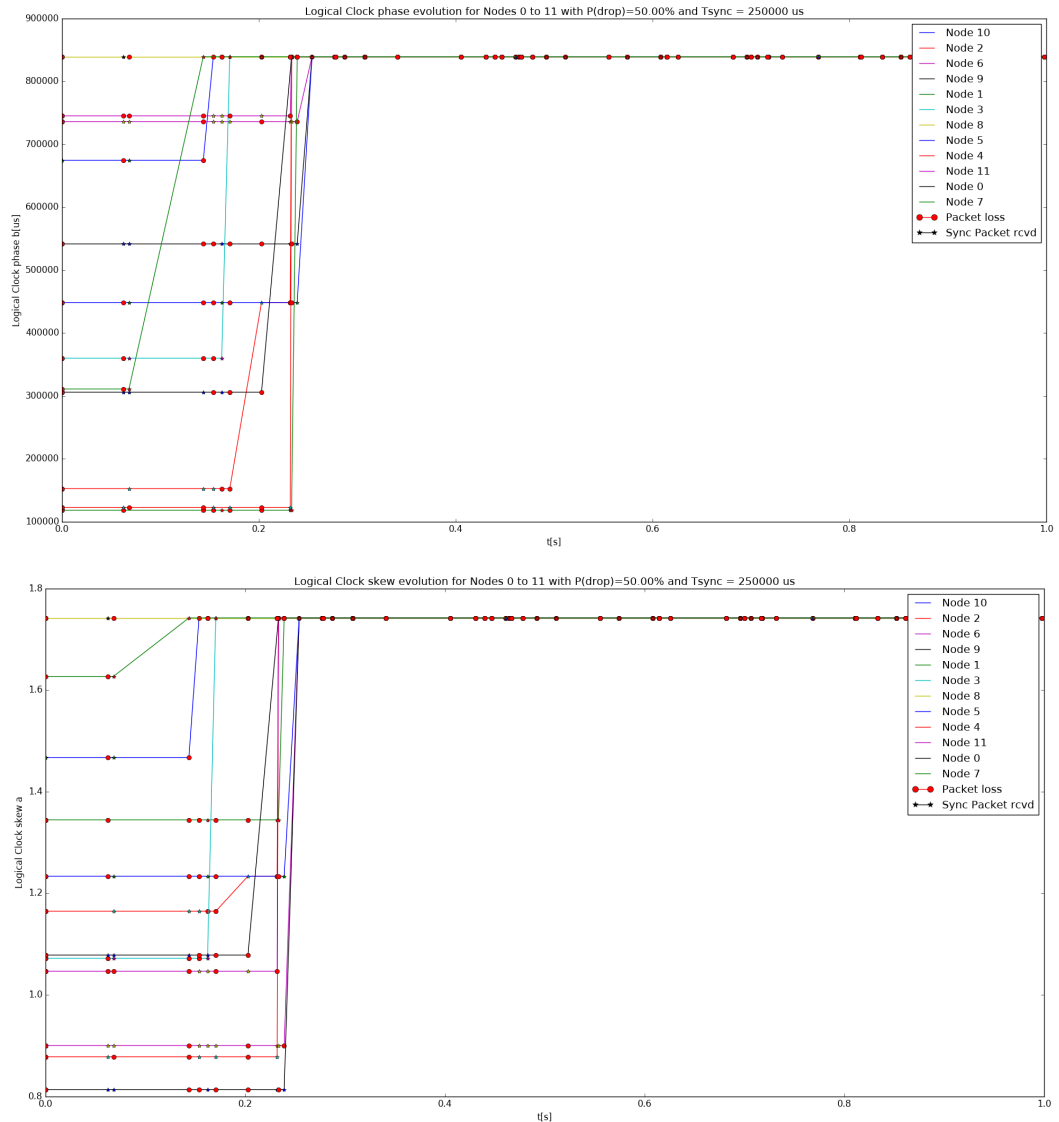


Abbildung 17: Uhren Phasen- und Driftsynchronisation von 10 Yete-Knoten mit einem Austauschintervall von Zeitsynchronisationsdaten von 250 ms und einer Paketverlustrate von 50%.

2.1.5 Verteiltes Rechnen

Innerhalb des YETE-Netzwerks wurde eine Taskverteilung realisiert. D.h. Aufgaben, die durch das Softwaresystem übernommen werden, wie beispielsweise Regelalgorithmen oder auch Kommandointerpreter werden nicht explizit auf einem einzelnen Knoten ausgeführt, sondern werden im Gesamtsystem dynamisch auf die einzelnen Knoten verteilt.

Hier wurden durch das Projekt VIDANA bereits wichtige Grundlagen entwickelt, auf die nun YETE aufbauen konnte. Durch die kabellose Verbindung zwischen den einzelnen

Knoten wurden allerdings umfangreich Anpassungen nötig, da das System nun auch mit unsicheren Verbindung mit hohen Datenverlusten umgehen können musste. Die Verteilung der Aufgaben im System übernimmt der Task Distributor. Dieser überwacht ständig die Ausführung der Tasks und reagiert durch Neuverteilung auf etwaige Ausfälle. Sollte der Knoten des Task Distributor selbst von einem Ausfall betroffen sein, springt automatisch ein anderer Knoten als dieser ein. Der Task Distributor versucht zudem die Last möglichst gleich auf alle Knoten zu verteilen, um Engpässe zu vermeiden.

2.1.6 Human-Machine Interface

2.1.6.1 Komponenten

Ein wesentlicher Bestandteil des YETE Projekts war auch zu untersuchen, wie die Interaktion zwischen einem menschlichen Bediener und so einem verteilten System aussehen soll. Dazu wurde eine Kommando- und Kontrollstation für das Demonstrations-System entwickelt, die eine intuitive und übersichtliche Bedienung der YETE-Fahrzeuge ermöglicht.

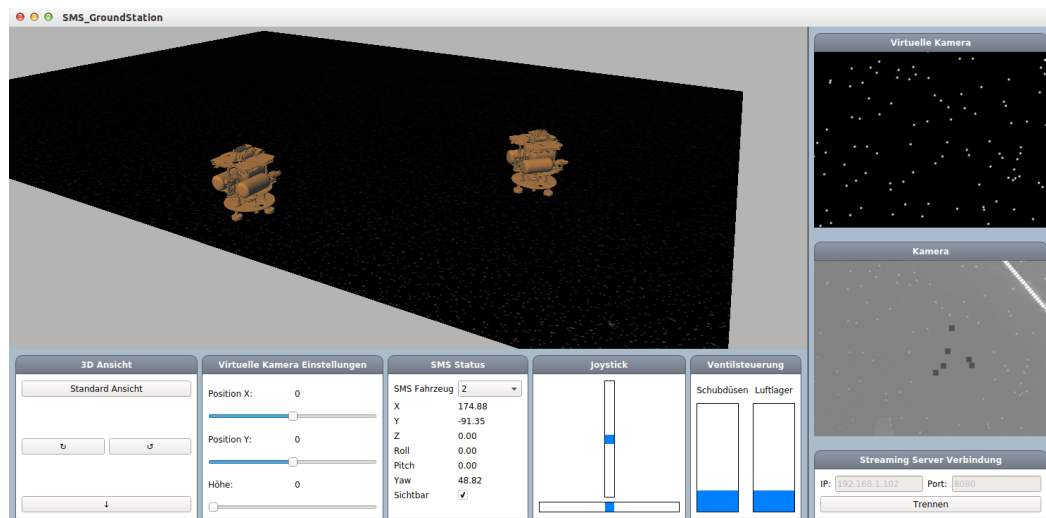


Abbildung 18: Benutzeroberfläche der Kommandostation.

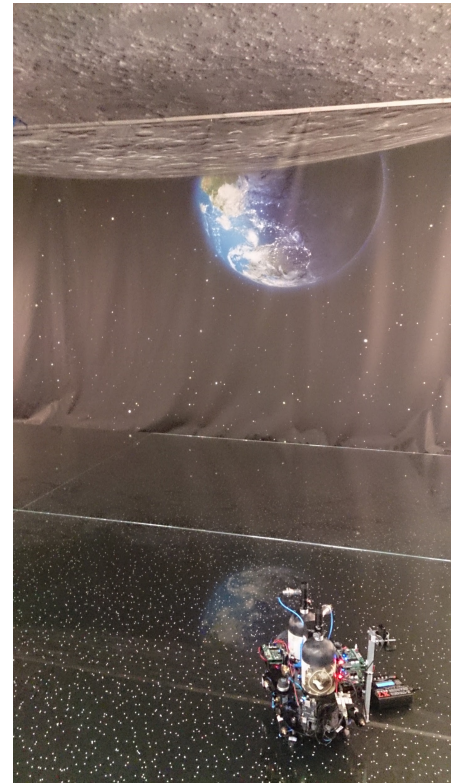
2.1.7 Hardware Demonstrator SMS

2.1.7.1 Aufbau

Zu Beginn des Projekts stellte sich die Frage, welches System optimal zur Entwicklung und später zur Demonstration der Ergebnisse geeignet ist. Ziel sollte eine möglichst realitätsnahe Simulation eines Satellitensystems sein, das zugleich einen möglichst breiten Bereich der in der SatXX-Studie identifizierten Sensorik und Aktuatorik abdeckt. Zudem sollte das hier entwickelte System möglichst auch für spätere Arbeiten im Bereich der Forschung und Lehre verwendbar sein.

Letztendlich fiel die Entscheidung auf ein System, das mit Vehikeln, die auf einer dünnen Luftschicht schweben die Reibungsfreiheit im Weltraum nachstellen kann. Die Vehikel besitzen ein Luftdrucktank und können mit Hilfe von Luftdüsen über eine Glasplatte navigieren. Unterhalb des Glasplatte befindet sich ein gedruckter Sternenhimmel, der analog zu einer Sternenkamera an Bord eines Satelliten zur Orientierungs und Positionsbestimmung verwendet werden kann.

In Abbildung 19 ist eines dieser Gefährte abgebildet und die einzelnen Komponenten beschriftet. Bei den Luftdrucktanks handelt es sich um handelsüblich Paintball-Tanks die mit bis zu 300 Bar bedruckt werden können. Als Prozessor Boards wurden die in YETE entwickelten Platinen verwendet, die dann als kabellos verbundener Cluster zusammenarbeiten.



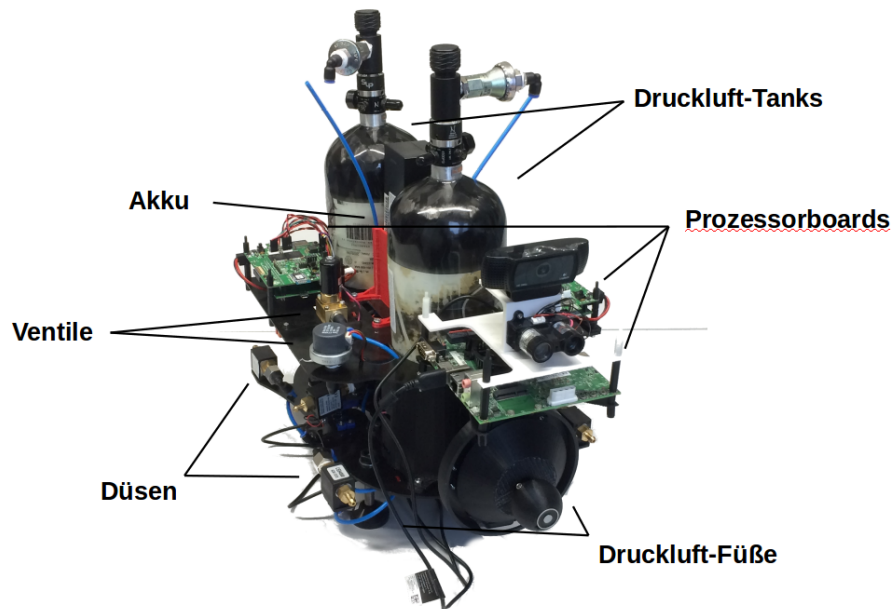


Abbildung 19: YETE-Demonstratorvehikel.

2.1.7.2 Systemmodell und Subsystemfehler tolerante Orientierungsregelung

Um die Orientierung des Hardware demonstrators effektiv regeln zu können wurde im ersten Schritt von LS VII ein Modell der Dynamik des SMS Fahrzeugs erstellt. Auf Basis dieses Modells konnten im nächsten Schritt erste Verhaltenssimulationen des Fahrzeugs innerhalb der Matlab/Simulink™ Umgebung durchgeführt werden. Nach mehreren Versuchen den bereits entwickelten verteilten H-infinity Regler auf ein linearisiertes Modell des SMS Fahrzeugs für die Orientierungsregelung anzupassen, wurde klar, dass sich der Regleransatz nicht direkt auf dieses unteraktuierte hoch nicht-lineare System des SMS Fahrzeugs anwenden ließ. Daher wurde für die Orientierungsregelung von LS VII ein intelligenter Lyapunov und PID basierter Regler mit Vor- und Nachfilter entworfen, welcher sowohl die Thruster als auch das vorhandene Reaktionsrad zur Orientierungsregelung nutzt. Dabei versucht der Regler soweit wie möglich das Reaktionsrad einzusetzen um den Treibstoff der Thruster zu sparen, erst wenn das Reaktionsrad in den Sättigungsbereich gerät werden die Thruster sukzessive stärker in die Regelung involviert. Zusätzlich wurde der Regler so konzipiert, dass er selbst bei Ausfall/Integration des Reaktionsrad-Yete-Knotens zur Laufzeit die Orientierung des Fahrzeugs immer noch stabil regeln kann. Der Regler wurde ausführlich anhand des dynamischen nicht-linearen Modells in Matlab/Simulink™ getestet. In Abbildung 20 ist das Regelverhalten anhand einer sinusförmigen Solltrajektorie über den gesamten Winkelbereich aufgetragen, das Fahrzeug folgt leicht verzögert der Referenz. Die intelligente Balancierung zwischen

Thruster und Reaktionsrad ist für die sinusförmige Trajektorie in Abbildung 21 zu sehen.

Es ist deutlich zu sehen, wie die Thruster sich an der Regelung der Orientierung beteiligen, sobald sich das Reaktionsrad der Sättigung nähert. Ein Ausfallszenario ist in Abbildung 22 Zu sehen, hier fällt bei $t=250$ s der Reaktionsrad-Knoten aus und der Regler kompensiert den Ausfall automatisch über die Thruster. In der Orientierungstrajektorie ist der Ausfall kaum zu bemerken, das System folgt der Referenz weiterhin stabil. Dies ist ein Beispiel für eine System-struktur-adaptive Regelung innerhalb des Yete-Systems und erlaubt so eine robuste Regelung bei Yete-Knotenausfällen oder Erweiterungen.

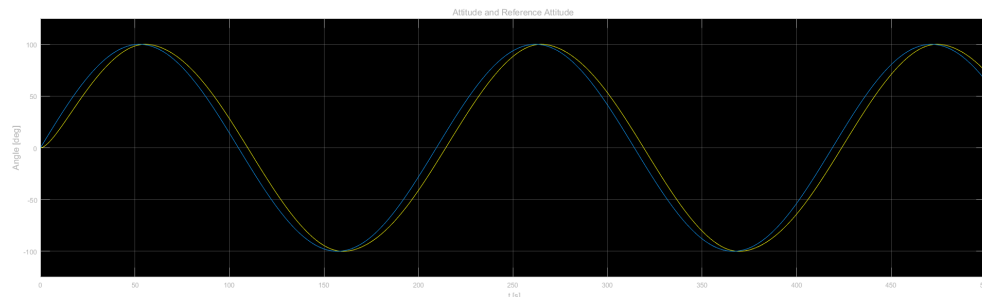


Abbildung 20: Gutes Sollwertfolgeverhalten der geregelten SMS Fahrzeugorientierung bei Vorgabe einer sinusförmigen Referenztrajektorie.

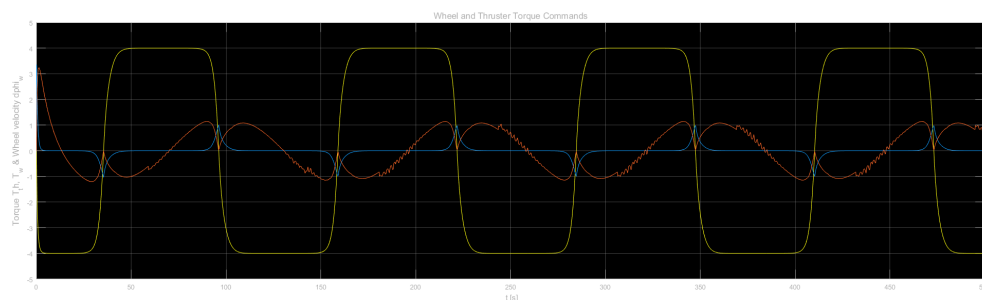


Abbildung 21: Visualisierung der Kontrolloutputs für Thruster (orange) und Reaktionsrad (blau) bei Vorgabe der sinusförmigen Referenztrajektorie aus Abb. 7.2. Es ist deutlich zu sehen, wie der Regler die Thruster desto stärker einsetzt je mehr die Reaktionsradgeschwindigkeit (gelb) in die Sättigung läuft.

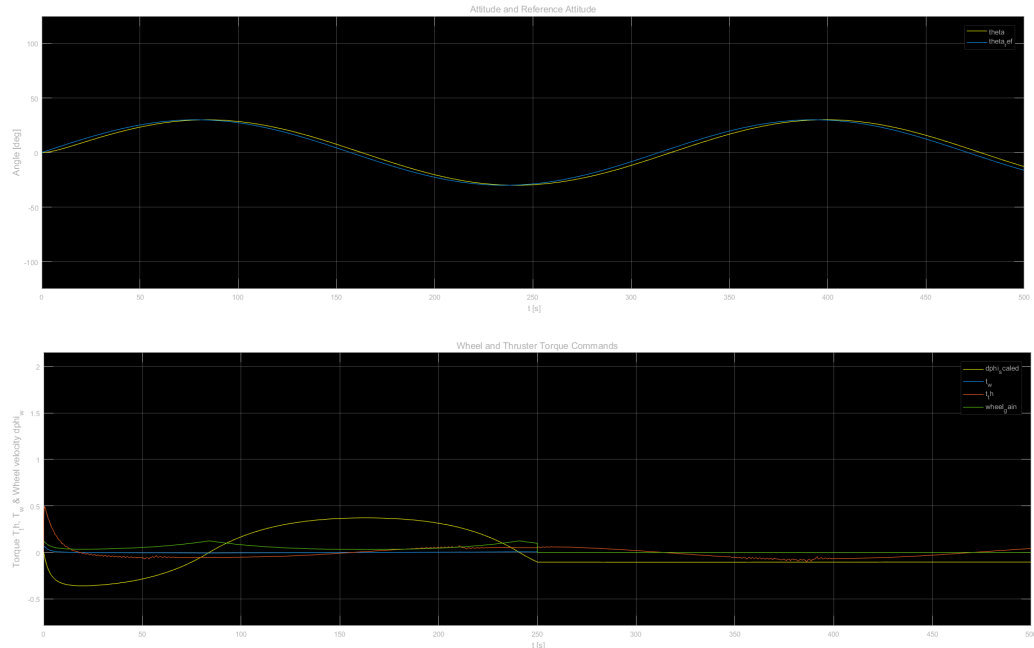


Abbildung 22: Oben: Sinusförmige Referenztrajektorie (blau) und geregelte Orientierung des Fahrzeugs (gelb). Unten: Zur Regelungs korrespondierender Kontrolloutput an die Thruster (orange) und das Reaktionsrad (blau). Der Gainfaktor (grün) gibt an, wie sehr der Regler das Reaktionsrad im Verhältnis zu den Thrustern bevorzugt. Als der Regler bei $t=250$ einen Ausfall des Reaktionsrades feststellt, passt er den Gain automatisch an und regelt die Orientierung ausschließlich über die Thruster weiter. Die Orientierungstrajektorie des Fahrzeugs wird so trotz Ausfall kaum beeinflusst.

2.1.8 Technologietransfer und weitere Yete-Konzepte

2.1.8.1 YETE-C Knoten

Zur Entwicklung der verschiedenen YETE-Softwarekomponenten wurden die im Rahmen von YETE erstellten Entwicklungsboards verwendet. Um aber zu zeigen, dass für den tatsächlichen Einsatz im Weltraum an Bord eines Satelliten die einzelnen Rechnerknoten deutlich miniaturisiert werden können, wurde auch ein kleiner YETE-Rechnerknoten umgesetzt. Neben einem sparsam Prozessor sind ein Bluetooth Interface, ein Inertialmesssystem, ein Klimasensor und eine Ladeelektronik für LiPo-Akkus auf der nur ca. 1,5 cm x 3,5 cm großen Platine untergebracht (Abbildung 23).

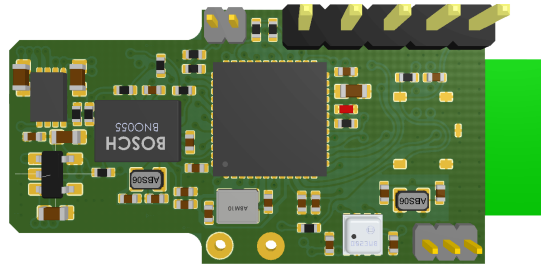


Abbildung 23: YETE Miniatur Knoten.

2.1.8.2 Automobil-Konzept

Auch ein Einsatz der in YETE entwickelten Technologien außerhalb der Luft- und Raumfahrt wurde betrachtet. Unter anderem wurde eine kleine Studie erstellt, die einen möglichen Technologietransfer in die Automobilbranche näher untersucht. Im Rahmen des Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress wurde die Ergebnisse dieses "Blicks über den Tellerrand" präsentiert.

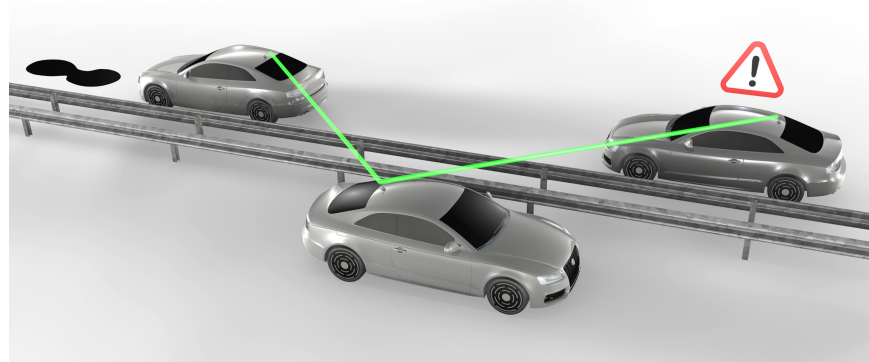


Abbildung 24: Beispiel von YETE-Technologie im Straßenverkehr: "Virtuelles Warndreieck".

2.1.8.3 Yete-Modul Konnektor

Im Zuge der Hardwareentwicklungen des Yete-Projekts wurde unter starker studentischer Beteiligung eine vierfach redundante Hardware-Kupplung entworfen (s.h. Abbildung 25) um größere Yete-hardware-module zuverlässig miteinander zu koppeln. Redundanz bezieht sich in diesem Fall auf die Möglichkeit die Kupplung noch lösen zu können, sollten drei der vier Öffnungsmöglichkeiten (zwei pro Kupplungsseite) ausfallen. Selbst bei komplettem Energieverlust lässt sich die Kupplung noch von außen, bspw. mit einem Roboterarm lösen. Die Kupplung selbst ist radialsymmetrisch, erlaubt eine

vielzahl an Schnittstellen Elementen in ihrer Mitte (elektrisch, hydraulisch, optisch, ...) und ist selbstsperrend, verbraucht also nur Energie beim Öffnungs- und Schließvorgang. Zusätzlich wurde beim Design der Kupplung darauf geachtet, dass alle Elemente CoTS sind oder sich einfach im 3D-Druckverfahren herstellen lassen. Ein funktionsfähiger Prototyp ist in Abbildung 26 zu sehen, welcher mit als Schnittstellenelement eine elektrische Verbindung besitzt. In Abb. 8.4 ist auch eine passive unaktuierte Variante der Kupplung zu sehen, wodurch das gesamt Kupplungssystem allerdings dann nur noch zweifach Redundant wäre.

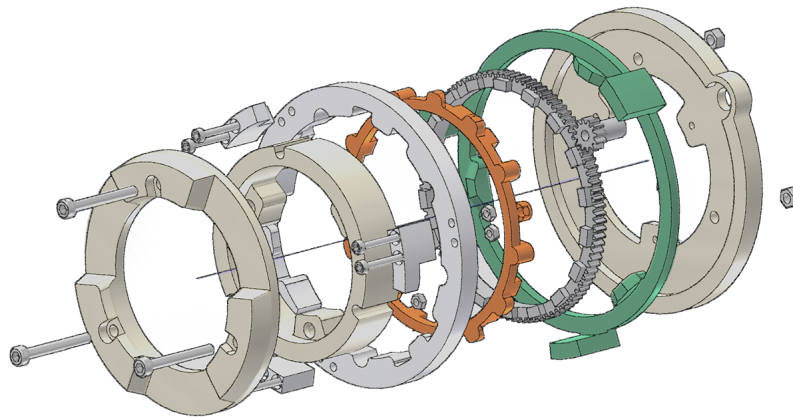


Abbildung 25: Explosionszeichnung des zweifach redundant ausgelegten Yete-Modul-Konnektors.

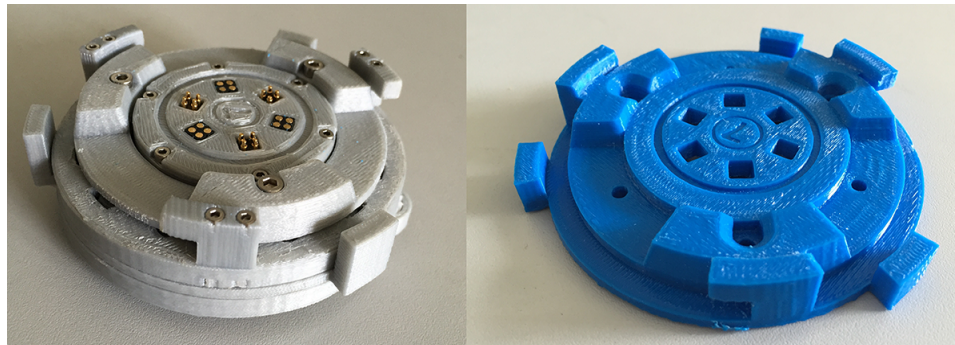


Abbildung 26: Links: Fertig fabrizierter Yete-Modul-Konnektor inkl. Daten- und Energieverbindungen. Rechts: Beispiel eines passiven Konnektors, noch ohne elektrische Kontakte.

2.1.8.4 Modularer-Yete-Roboterarm

Während der Projektlaufzeit wurde noch ein weiteres potentiell Anwendungsbereich des Yete-Konzepts exploriert: Die modulare Robotik.

Zu diesem Zweck wurde unter studentischer Beteiligung ein modulares Roboterarmkonzept entworfen, welches aus einzelnen Armsegmenten besteht, welche sich selbst an- und abkoppeln können. Ein solches Armsegment ist in Abbildung 27 dargestellt, ist ca. 20 cm lang und wiegt ca. 280g. Der Aktuator des Armsegmentes hat ein Drehmoment von 58 kg/cm wodurch ein drei-segmentiger Arm in der Lage ist sein eigenes Gewicht zu tragen. Dadurch wäre

eine Assemblierung von Armsegmenten durch einen Yete-Roboterarm möglich. Als Kupplung zwischen den Segmenten wurde eine miniaturisierte Variante der Yete-Modul-Kupplung entworfen, welche sich von beiden Verbindungsseiten selbstständig öffnen und schließen lässt. Ein funktionsfähiger Prototyp ist in Abbildung 28 zu sehen.

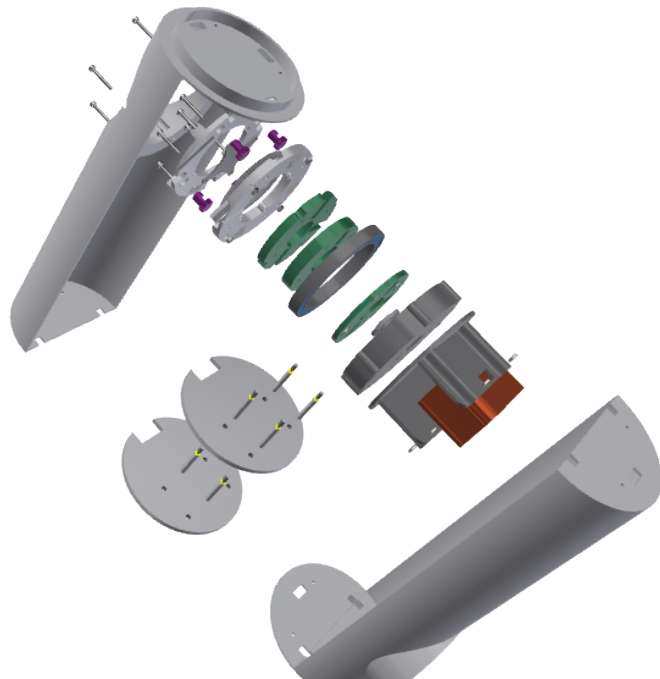


Abbildung 27: Explosionszeichnung eines Segmentes des modularen Yete-Roboterarms.

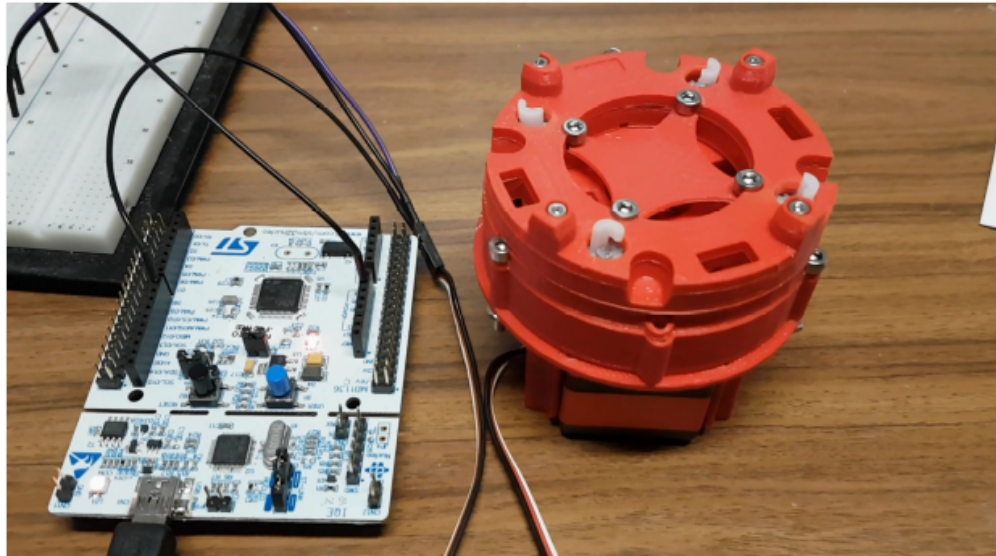


Abbildung 28: Zentraler Aktuator des modularen Roboterarms mit 58 kg/cm Drehmoment und Kontrollboard im Vordergrund. Endstück des Aktuators bildet eine motorisierte, miniaturisierte Version des Yete-Modul-Konnektors.

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Der größte Teil (ca. 90%) der Zuwendung floß wie auch in der Planung veranschlagt in die Personalkosten. Hier konnten zu den jeweiligen wissenschaftlichen Mitarbeitern auch studentische Hilfskräfte Arbeiten ins Projekt einbringen und wesentlich zum Erfolg des Projekts beitragen. Die restlichen Mittel verteilten sich auf Sachmittel zur Beschaffung von entsprechenden Entwicklungstools bzw. zum Aufbau der Demonstratoren, und auf Dienstreisen um den Projektfortschritt bzw. wesentliche Erkenntnisse auf Konferenzen bzw. beim Projektträger zu präsentieren. Einen Auszug der Veröffentlichungen die im Rahmen von Konferenzteilnahmen entstanden sind, findet sich unter dem Punkt *Veröffentlichungen*.

2.3 Notwendigkeit/ Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in diesem Vorhaben gemachten Erfahrungen waren notwendig, um die Machbarkeit des neuartigen Ansatzes eines verteilten, fraktionierten Raumfahrzeuges zu beweisen. Insbesondere wurde die Realisierbarkeit einer physikalisch verteilten Regelung basierend auf kabelloser Kommunikation gezeigt. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die durchgeführten Arbeiten der Zielsetzung der Vorhabens angemessen waren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

Die Ergebnisse, die im Rahmen von YETE erzielt werden konnten, werden aktuell bereits in Folgeprojekten eingesetzt und auch zukünftige Projekte werden auf diese Bezug nehmen.

Das Funkprotokoll CAPRI wird am Lehrstuhl VIII im Rahmen des Projekts *SKITH* (FKZ 50RP1607) weiterentwickelt und soll somit Anfang 2019 im Weltraum erprobt werden. Mit diesem, aus dem YETE-Projekt hervorgegangenen Konzept, konnte auch im Rahmen des Innospace Masters Wettbewerbs 2016 ein großer Erfolg erzielt werden.

Mit den aussagekräftigen Ergebnissen und dem entstandenen Framework, das sich für umfangreiche darauf aufbauende Arbeiten anbietet, wurde 2017 ein Antrag auf ein direktes Folgeprojekt *YETE2 - Schwarmintelligenz im Weltraum* gestellt. Hier gab es bereits sehr positive Rückmeldungen und wir hoffen auf einen Projektbeginn im August 2017. An diesem Projektantrag sind die Partner Universität Würzburg Lehrstuhl VIII und Zentrum für Telematik beteiligt.

Die Ergebnisse bieten unmittelbare Anregung für anstehende und bereits laufende Projekte mit kooperierenden Kleinst-Satelliten wie „NetSat“, das 2018 gestartet werden soll. Außerdem wird im Projekt „TOM“ an einer Mission mit sehr eng kooperierenden Erdbeobachtungssatelliten gearbeitet. Diese sollen auch mittels Inter-Satellitenkommunikation gemeinsame Aufgaben wie photogrammetrische Erdobservationen durchführen. Dazu werden unter anderem auch Ansätze aus YETE verwendet um die verteilten Systeme optimal zu regeln. So wird die Verwertbarkeit der Projektergebnisse direkt in konkreten Missionen getestet und es wird auch weiterer Handlungsbedarf durch die hier gemachten Erfahrungen angeregt.

Die im Rahmen von YETE entwickelten Demonstrator Vehikel, die eine Simulation der Reibungsfreiheit im Weltraum ermöglichen und somit die realitätsnahe Erprobung von Regelalgorithmen erlauben, werden weiterhin im Rahmen von Lehre und Forschung eingesetzt. Sie haben sich als ideale Plattform zur Erprobung von experimentellen Kommunikations- bzw. Regelkonzepten bewährt.

2.5 Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Uns ist während der Projektlaufzeit kein Forschungsvorhaben bekannt geworden, das einen ähnlich innovativen Ansatz eines fraktionierten Raumfahrzeugs mit den zugehörigen Regel- und Kommunikationsstrategien verfolgt. Es gibt Anknüpfungspunkte mit anderen Projekten im Bereich der verteilten Raumfahrtsysteme, jedoch sind uns keine Vorhaben bekannt, die speziell die Software-, Kommunikations- und Regelprobleme gezielt gelöst haben.

2.6 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts konnten einige Veröffentlichungen durchgeführt und vorbereitet werden. Dazu zählen:

YETE: Distributed, networked embedded control approaches for efficient, reliable mobile systems. Tobias Mikschl, Alexander Hilgarth, Florian Kempf, Ali Kheirkhah, Tristan Tzschichholz, Sergio Montenegro, Klaus Schilling: DASIA, Warsaw, Poland, 2014.

A Flexible Hardware Test Demonstration Platform for the Fractionated System Architecture YETE. Kempf, Florian; Haber, Roland: 4th IFAC Symposium on Telematics Applications, Porto Alegre, Brazil, 2016.

Reliable Networked Distributed On-Board Data Handling Using a Modular Approach with Heterogeneous Components. Florian Kempf, Alexander Hilgarth,

Ali Kheirkhah, Tobias Mikschl, Tristan Tzschichholz, Sergio Montenegro, Klaus Schilling: Small Satellite Systems and Services Symposium, Majorca, Spain, 2014.

AIRTEC2014: Gemeinsamer Stand mit der Uni Würzburg mit Vorstellung des Projektes.

YETE- Distributed communication, computation and control for fractionated spacecraft. Florian Kempf, Alexander Hilgarth, Ali Kheirkhah, Tobias Mikschl, Tristan Tzschichholz, Sergio Montenegro and Klaus Schilling
International Workshop on Fractionated Spacecraft (IWFS), Delft, The Netherlands, 2014.

YETE: Robuste, verteilte Systeme im Automotive- und Aerospacebereich durch eine modulare, flexible Echtzeitplattform. A. Hilgarth, T. Mikschl, S. Montenegro, K. Schilling, F. Kempf, A. Kheirkhah, T. Tzschichholz: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), Augsburg, 2014.

Robust distributed control for a mechanical-electrical demonstrator considering communication constraints. A. Kheirkhah, F. Kempf, T. Tzschichholz, K. Schilling: 2nd IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control (CESCIT), Maribor, Slovenia, 2015.

Resource sharing, communication and control for fractionated spacecraft (YETE). F. Kempf, K. Schilling, S. Montenegro, T. Mikschl, A. Hilgarth, A. Kheirkhah, T. Tzschichholz: IEEE Aerospace Conference, 2015.

Collision Free Protocol for Ultrawideband Links in Distributed Satellite Avionics. Tobias Mikschl, Richard Rauscher, Sergio Montenegro, Klaus Schilling, Florian Kempf, Tristan Tzschichholz: Small Satellite Systems and Services Symposium, Valetta, Malta, 2016.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel YETE – Physikalisch Verteilte Steuerung im Weltraum	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kempf, Florian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Informatik VII Robotik und Telematik Fakultät für Mathematik und Informatik Julius-Maximilians-Universität Würzburg Am Hubland 1 97074 Würzburg Germany	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 50RA1331
	11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn Germany	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Aktivitäten und Ergebnisse des DLR-Projektes „YETE- Physikalisch verteilte Steuerung im Weltraum“. Das Projekt wurde im Verbund mit den Lehrstühlen Informatik VII und VIII der Universität Würzburg und dem Zentrum Für Telematik e.V. durchgeführt. Die Projektleitung lag beim Lehrstuhl für Informatik VIII. Ziel des Projektes war die Entwicklung bzw. Erprobung neuartiger Konzepte zur Regelung und Kommunikation modularer fraktionierter Weltraumfahrzeuge und der Demonstration dieser Konzepte anhand von Hardware Demonstratoren. Besonderer Fokus lag dabei auf verteilter Regelung, selbstorganisierender Kommunikation und verteiltem Rechnen.	
19. Schlagwörter Fraktionierte Systeme, verteilte Regelung, fehlertolerante Regelung, verteiltes Rechnen	
20. Verlag	21. Preis

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 514325-9

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report
3a. Report Title YETE – Physikalisch Verteilte Steuerung im Weltraum	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s))	5. End of Project 31.12.2016
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Informatik VII Robotik und Telematik Fakultät für Mathematik und Informatik Julius-Maximilians-Universität Würzburg Am Hubland 1 97074 Würzburg Germany	7. Form of Publication Final report
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn Germany	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 50RA1331
	11a. No. of Pages Report
	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References
	14. No. of Tables
	15. No. of Figures
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract This final report presents the activities and results of the DLR project “YETE-Physikalisch verteilte Steuerung im Weltraum“. The project was carried out in cooperation with the Chairs of Computer Science VII and VIII of the University of Würzburg and the Zentrum für Telematik e.V. . The project coordinator was the Chair of Computer Science VIII. The aim of the project was the development and testing of innovative concepts for control and communication of modular fractionated space craft and the demonstration of the performance and applicability of these concepts by the use of hardware demonstrators. The main focus was on distributed control, self-organizing communication and distributed computing.	
19. Keywords Fractionated systems, distributed control, fault tolerant control, distributed computing	
20. Publisher	21. Price