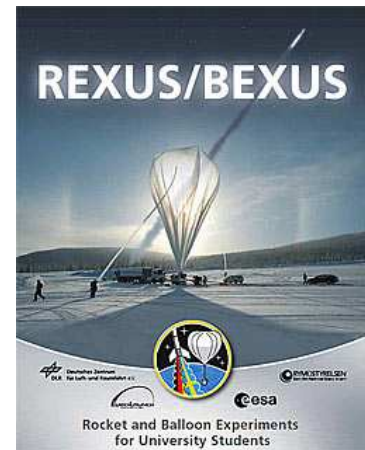




## Experiment BEXUS-IMUFUSION der Hochschule Nordhausen Technik-Newsletter Nr. 3 – Der Projektüberblick Stand 17.06.2019

### 1. Europäisches Programm REXUS/BEXUS und Nordhäuser Experiment BEXUS-IMUFUSION

“The REXUS/BEXUS programme is realised under a bilateral Agency Agreement between the German Aerospace Center (DLR) and the Swedish National Space Board (SNSB). The Swedish share of the payload has been made available to students from other European countries through the collaboration with the European Space Agency (ESA). Experts from DLR, SSC, ZARM and ESA provide technical support to the student teams throughout the project. EuroLaunch, the cooperation between the Esrange Space Center of SSC and the Mobile Rocket Base (MORABA) of DLR, is responsible for the campaign management and operations of the launch vehicles.” /DLR, ESA/



Das **Ballonsystem BEXUS** mit einer Gesamtlänge von ca. 100 m besteht aus folgendem Equipment: Ballon mit Helium-Wasserstoff-Füllung (ca. 45 m), Trennvorrichtung (Cutter), Fallschirm (80 m<sup>2</sup> bis 120 m<sup>2</sup>), Verkehrsinformationssystem (Transponder, Reflektor, Blitzlicht), Gondel (bis zu 120 kg Gesamtlast, Batteriemodul, E-Link Telemetry).

Das **Experiment BEXUS-IMUFUSION** (Inertial Measurement Unit, IMU) wurde in den Jahren 2017 und 2018 von Studierenden der Hochschule Nordhausen durchgeführt. Nach einjähriger Vorbereitung erfolgte der Flug am 17.10.2018 mit dem Stratosphärenballon BEXUS 26. In der Gondel befanden sich Experimente mehrerer Europäischer Studententeams, welche am Programm REXUS/BEXUS teilnehmen durften (**R**ocket **EX**periments for **U**niversity **S**tudents/**B**alloon **EX**periments for **U**niversity **S**tudents). Einzelheiten zum Programm befinden sich auf der Europäischen Programmseite und auf der Seite des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR).

Die **Zielstellungen von BEXUS-IMUFUSION** waren: Entwicklung eines robusten Systems zur Aufnahme inertialer Messdaten in einem weltraumnahen Fahrzeug, hohe Zuverlässigkeit durch ein Redundanzkonzept, hohe Messgenauigkeit und Diagnosefähigkeit, Datenfusion und Berechnung der Trajektorie.

## 2. Team BEXUS-IMUFUSION

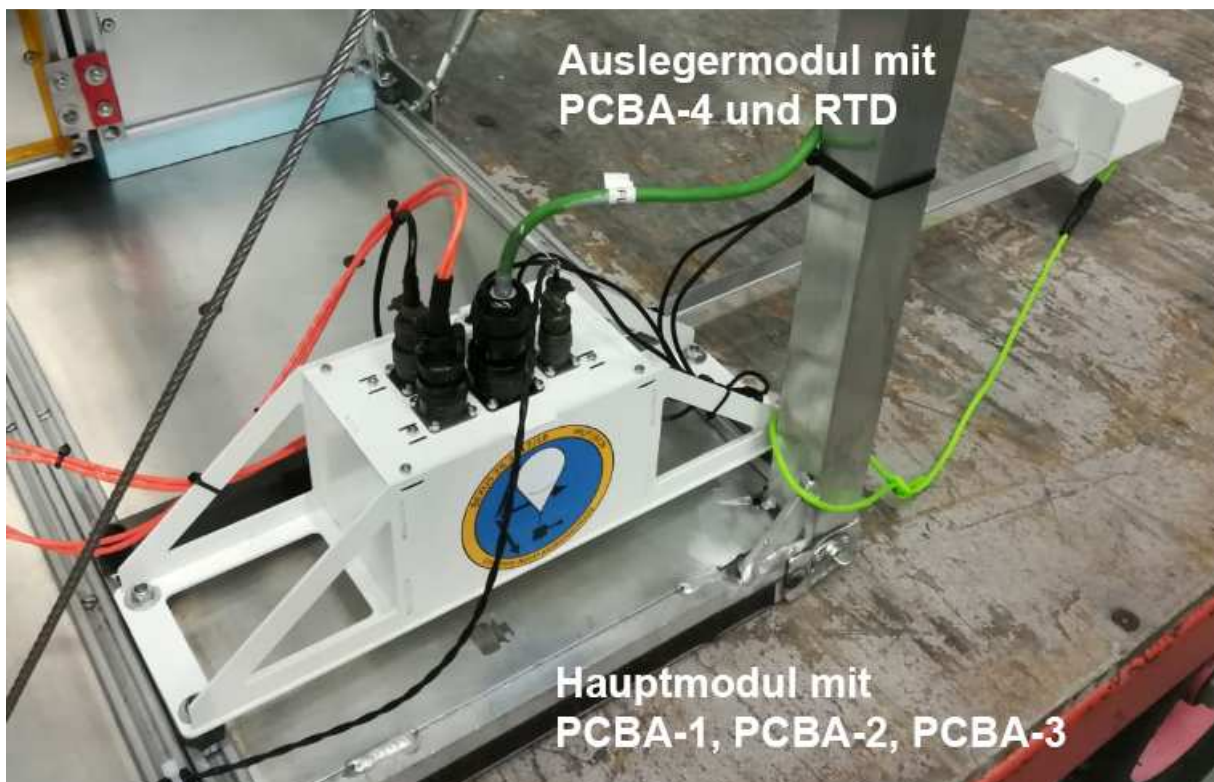


**Abbildung 1: Team BEXUS-IMUFUSION**

Prof. Viehmann, Mikael Steurer, Prof. Neitzke, Hannes Meyer, Max Goretti, Johannes-Friedrich Knappe, Johannes Müller (von links)

## 3. System BEXUS-IMUFUSION

Das System BEXUS-IMUFUSION, bestehend aus Haupt- und Auslegermodul mit einer Gesamtmasse von etwa 2 kg, siehe Abbildung 2, wurde zur Messung und Aufzeichnung von Lage-, Navigations- und Klimadaten an Bord entwickelt. Ergänzt wird es durch die Bodenstation IMUFUSION.



**Abbildung 2: System BEXUS-IMUFUSION in der Gondel**

## **Konstruktion und Bestandteile**

Für den Betrieb mit hoher Zuverlässigkeit unter erhöhten Beanspruchungen zeichnet sich das System durch die folgenden konstruktiven Maßnahmen aus.

### **Zuverlässigkeit**

Alle Komponenten zur Messung und Aufzeichnung der Lage-, Navigations- und Klimadaten sowie zur Energieversorgung sind redundant vorhanden. Lediglich das Ethernet-Interface und das systeminterne Leistungsmonitoring (Spannungs- und Strommessung) sind einfach enthalten. Unterstützt wurde die Sicherstellung einer hohen Zuverlässigkeit durch entwicklungsbegleitende Tests (beispielsweise Druck und Temperatur kombiniert, Langzeittest), eine industrielle Elektronikfertigung (Bestückung, Löten), softwaregestützte Überwachungs- und Selbstdiagnosefunktionen (Keep-Alive-Pulse, Watch Dog, Time Out, Plausibilitätsprüfungen, Kommandoquittierungen) sowie durch eine projektbegleitende Dokumentation (Student Experiment Documentation, SED), einschließlich Risikomanagement und Designreview.

### **Mechanische und elektrische Robustheit**

Die Gehäuse des Hauptmoduls und des Magnetometers vom Auslegermodul wurden aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigt und zur Reduzierung der Wärmeabsorption in weißer Farbe ausgeführt. Der Auslegerarm besteht aus karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) und wurde mit Reflexionsfolie umwickelt. Er erhielt eine mechanische Sollbruchstelle, wurde mit einem Nylonfangseil gesichert und besitzt eine längliche Öffnung, hinter welcher sich das Mantel-Widerstandsthermometer zur Außentemperaturmessung befindet. Die in die Abdeckplatte des Hauptmoduls integrierten Steckverbindungen entsprechen dem MIL-Standard. Auf die großflächige, impedanzarme und sternförmige Ausführung der Masseverbindungen wurde geachtet. Als Maßnahme zur Vermeidung elektrischer Überschläge wurden einige Stellen, insbesondere an Steckverbindern, blasenfrei lackiert. Aufgrund der kurzen Verweildauer in großer Höhe wurden keine besonderen Maßnahmen zur Steigerung der Strahlungsimmunität von Schaltkreisen ergriffen. Es erfolgte lediglich die Montage von PCBA-1 (Master) und PCBA-2 (Slave) im rechten Winkel zueinander (unterschiedliche Flächenanteile in Richtung Sonne). Die drei Leiterplatten im Hauptmodul sind durch Steckverbindungen miteinander kontaktiert und mittels Rahmen an der Abdeckplatte befestigt, so dass die gesamte Baugruppe im aktiven Betrieb für Prüfw Zwecke aus dem Gehäuse genommen werden kann.

### **Tieftemperatur- und Niederdruckeignung**

Die Eignung für Außentemperaturen bis etwa  $-60\text{ °C}$  wurde mit folgenden Maßnahmen erreicht: a) Auslegung der Verlustwärme im Hauptmodul zur Eigenheizung (für minimale Innentemperatur von  $-30\text{ °C}$ ); b) thermisches, schaumstoffartiges Isolationsmaterial mit Ausdehnungsreserve im Haupt- und Auslegermodul; c) Auswahl von Schaltkreisen mit Betriebs-(umgebungs)temperatur von  $-40\text{ °C}$  bis  $85\text{ °C}$  oder umfangreicher; d) Einsatz von temperaturbeständigen Außenleitungen. Bei der Auswahl der Bauelemente wurde auf ihre Niederdruckeignung geachtet. Die Unterstützung der Entwärmung der Bauteile in geringer und großer Höhe (luftleerer Raum) erfolgt durch Kühlkörper und großflächige, metallische Verbindungen.

## Bestandteile

Die Abbildung 3 beinhaltet eine Systemübersicht, unterteilt in die Komponenten PCBA-1 (Master), PCBA-2 (Slave), PCBA-3 (Power Supply) und PCBA-4 (Magnetometer).

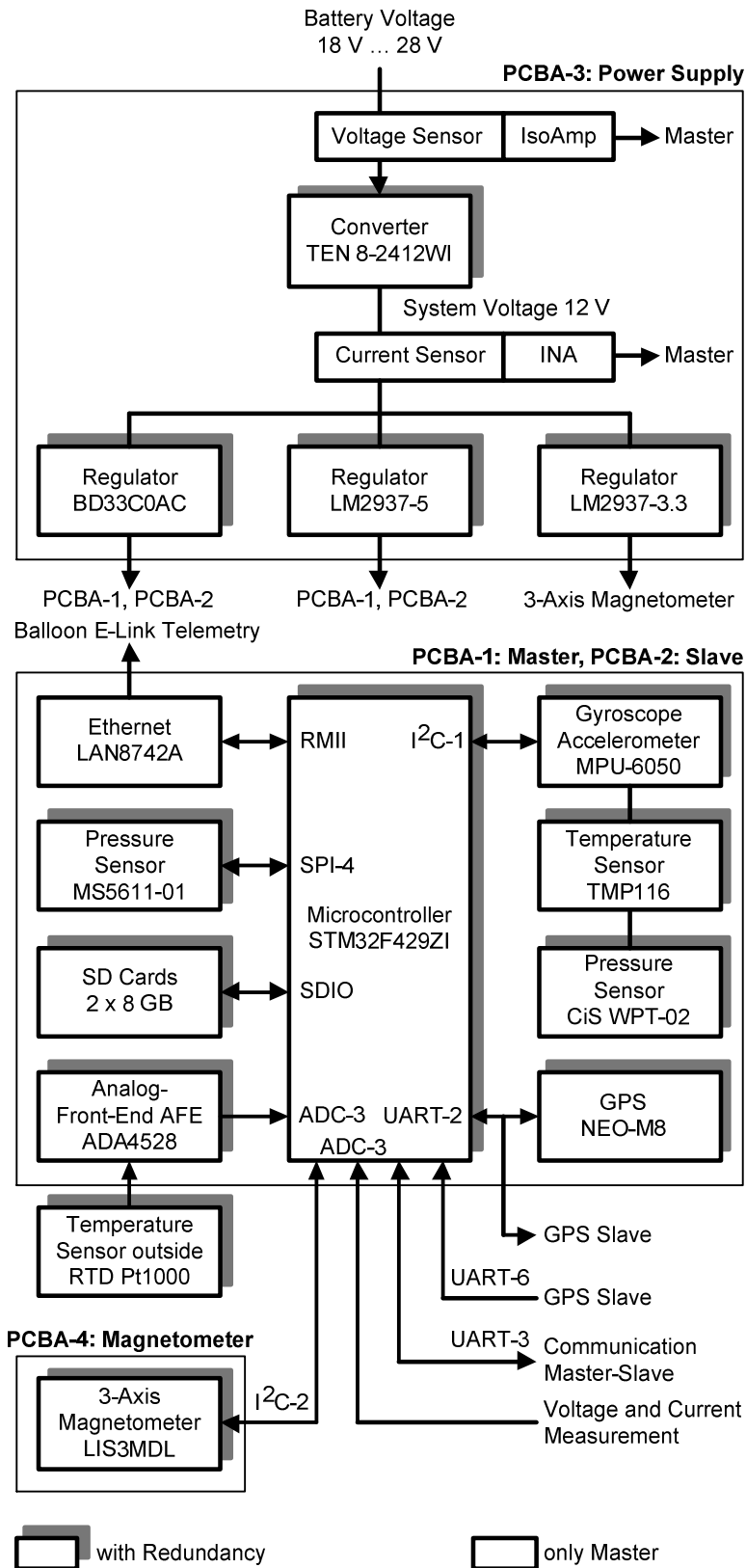


Abbildung 3: Systemübersicht BEXUS-IMUFUSION

### PCBA-1: Master und PCBA-2: Slave

Die Sensoren für die Lage-, Navigations- und Klimadaten sowie der Mikrocontroller und die SD Cards sind identisch auf beiden Leiterplatten enthalten, siehe Abbildung 4. Lediglich das Ethernet-Interface als Verbindung zur Balloon E-Link Telemetry (Ethernet 10/100 Base-T Protocol) und damit zur Bodenstation IMUFUSION und die Auswertung des systeminternen Leistungsmonitorings sind nur im Master vorhanden. Zur Erfassung der Temperatur im Hauptmodul dient der Sensor TMP116. Die Druckmessung erfolgt mit dem Sensor MS5611-01 und dem barometrischen Sensor CiS WPT-02, speziell von der CiS GmbH Erfurt für die Mission als MEMS-basierter Absolutdrucksensor mit Kompensationselektronik (Sensor-Signal-Conditioner ZSC31050 von IDT Inc.) und qualifizierter Langzeitstabilität entwickelt (Kalibrierung für 0,05 bar bis 1,3 bar). Die Messung der Außentemperatur erfolgt mit einem Analog-Front-End (AFE), bestehend aus RTD Pt1000 und Operationsverstärkern. Die GPS-Antennen sind auf der Gondel montiert.

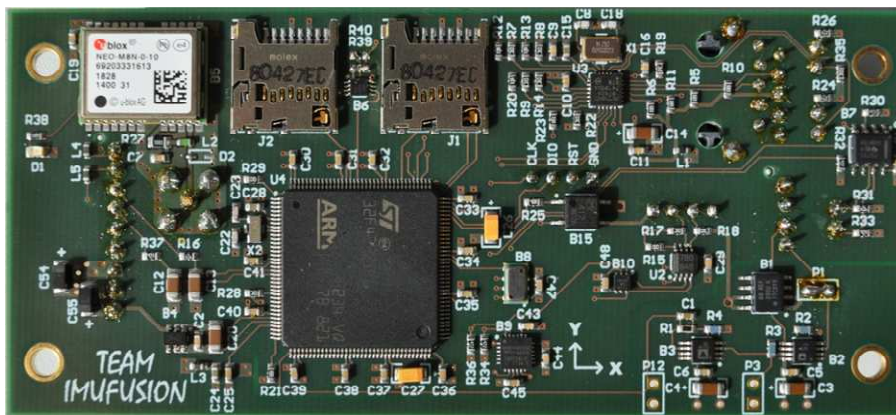


Abbildung 4: PCBA-1 bzw. PCBA-2

### PCBA-3: Power Supply

Auf dieser Leiterplatte sind (redundant) alle Elemente zur Spannungsaufbereitung enthalten, siehe Abbildung 5. Aus der für jedes Experiment an Bord der Gondel bereitgestellten Batteriespannung mit Nennwert 28 V (stark temperaturabhängig) werden die Systemspannung 12 V für IMUFUSION und daraus die spezifischen Betriebsspannungen von 3,3 V und 5 V aufbereitet. Lediglich einmalig ausgeführt sind die Messung der Batteriespannung und des Systemstromes für die Auswertung im Master.



Abbildung 5: PCBA-3

### PCBA-4: Magnetometer

Das Magnetometer ist am Auslegerende montiert (redundante Ausführung), was die Beeinträchtigungen der Messung durch Fremdfelder und Metallteile reduziert, siehe Abbildung 6.



Abbildung 6: Ausleger und PCBA-4

### Software und Bodenstation

Die Software an Bord erfüllt folgende Aufgaben: Aufnahme und Speicherung der Rohdaten (Abtastrate bis zu 100 Hz); Plausibilitätsprüfung und mathematische Vorverarbeitung (Mittelwertbildung, Umrechnungen, Berechnungen Position und Trajektorie); House-Keeping (Systemspannung und -strom, Innentemperatur, Überwachung und Selbstdiagnose, Kalibrierung); Master-Slave-Daten- und Funktionsmanagement; Kommunikation zwischen Master und Slave sowie mit Balloon E-Link Telemetry und Bodenstation. Die Software der Bodenstation IMUFUSION, siehe Abbildung 7, bietet die Funktionen: echtzeitnahe Abspeicherung und Aufbereitung der Daten zur Visualisierung (Sensorwerte, House-Keeping, GPS, Gondellage); Kommandogabe an Hauptmodul (Reset, Kalibrierung).

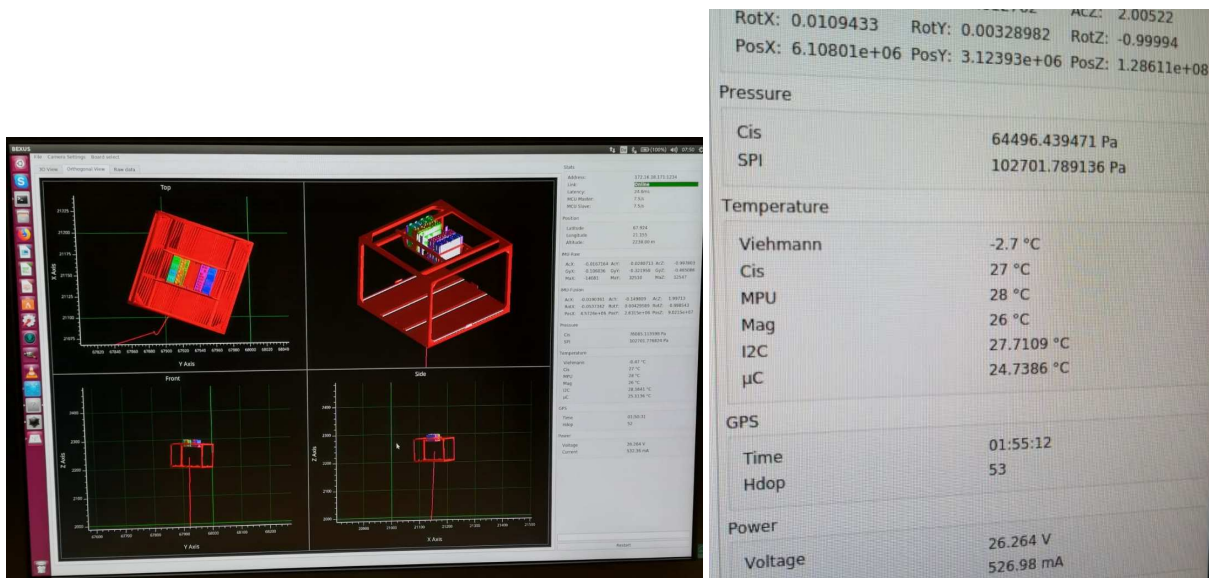


Abbildung 7: Flugdarstellungen der Bodenstation zur Gondellage und zum House-Keeping

## 4. Flugdaten und Nachbereitung



Abbildung 8: Im Hochschullabor – Systemvorbereitung für den Transport nach Esrange

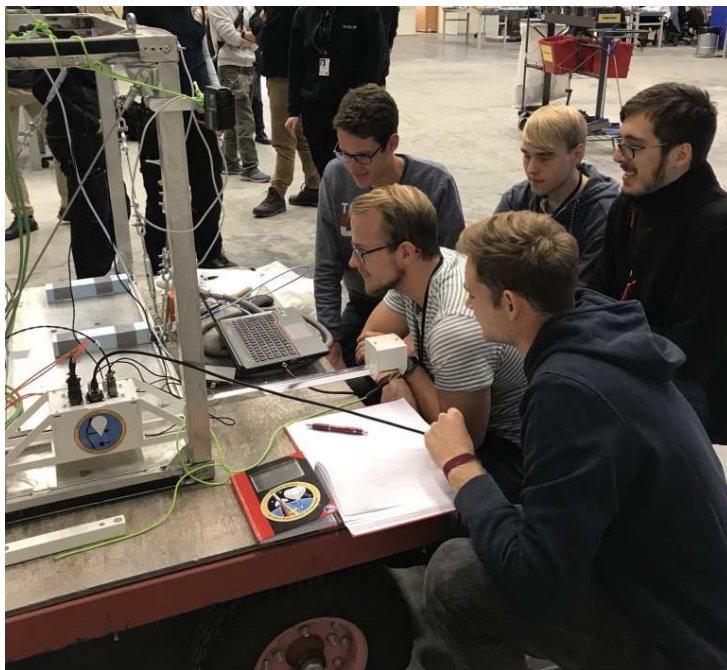


Abbildung 9: In Esrange – Eingebautes System



Abbildung 10: Take off BEXUS 26

Während des Fluges von BEXUS-IMUFUSION konnten die Lage-, Navigations- und Klimadaten erfasst werden. Flugregion und -zeit: Esrange Space Center (Swedish Space Corporation, SSC), 17.10.2018, 7.40 bis 11.20 Uhr; maximale Höhe: 27499 m; minimale Batteriespannung: 23,77 V; durchschnittlicher Systemstrom (Ebene 12 V): 500 mA bis 600 mA; gespeichertes

Datenvolumen: 14 GB. Die Abbildung 11 stellt ausgewählte Datenverläufe mit Bezug zur Flugzeit dar. Zu sehen sind der Druck (CiS WPT-02) von 14,52 mbar bis 988,56 mbar, die Innentemperatur (TMP116) mit dem Bereich 7,98 °C bis 39,30 °C (Masterwert), die Außentemperatur (RTD Pt1000) im Bereich -53,72 °C bis 0,92 °C und die Höhe (GPS Ballon) im Bereich von 327 m (Höhe beim Start)/277 m (Höhe bei der Landung) bis 27499 m. Der nicht dargestellte Verlauf der vom Slave mittels TMP116 gemessenen Innentemperatur beträgt aufgrund des geringeren Abstandes zwischen PCBA-2 (Slave) und PCBA-3 (Power Supply, Verlustwärme) 15,85 °C bis 48,15 °C.

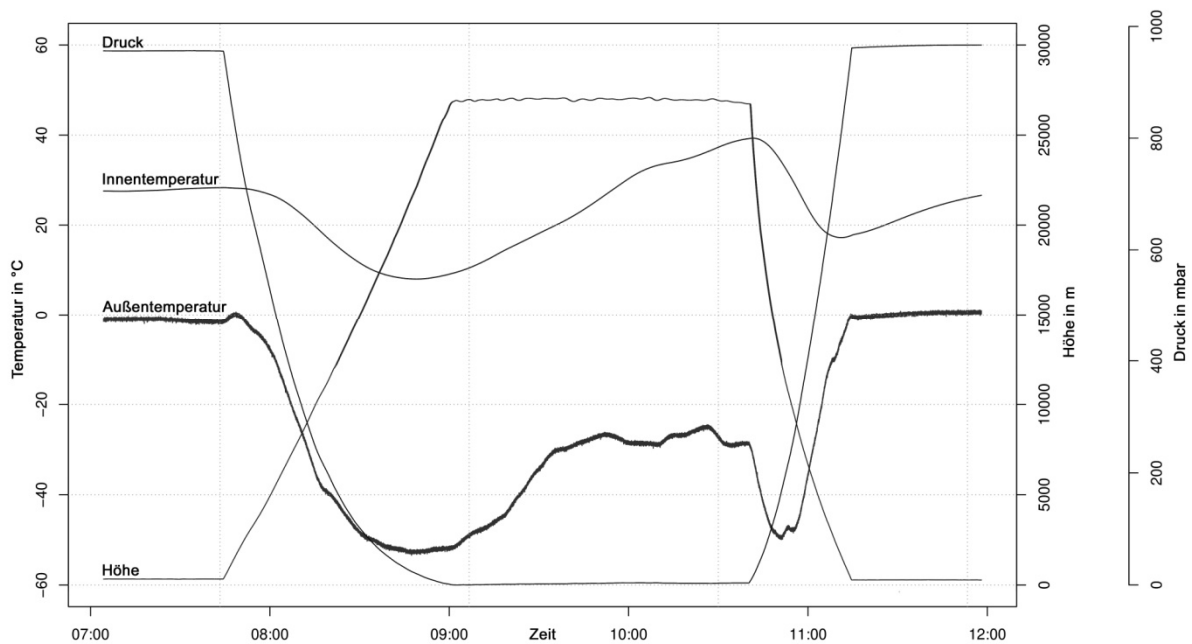


Abbildung 11: Ausgewählte Datenverläufe von BEXUS-IMUFUSION

Im Rahmen der Nachbereitung des Experiments erfolgten die Datenfusion und die Berechnungen der Position und der Trajektorie sowie der Vergleich mit den GPS-Daten. Für die Berechnung der Nord-, Ost- und Höhenvektoren in Relation zum körperfesten Koordinatensystem (KOS) wurden die gemessenen Beschleunigungs-, Drehraten- und Magnetfeldstärkewerte in x-, y- und z-Richtung verwendet, siehe Abbildung 12.

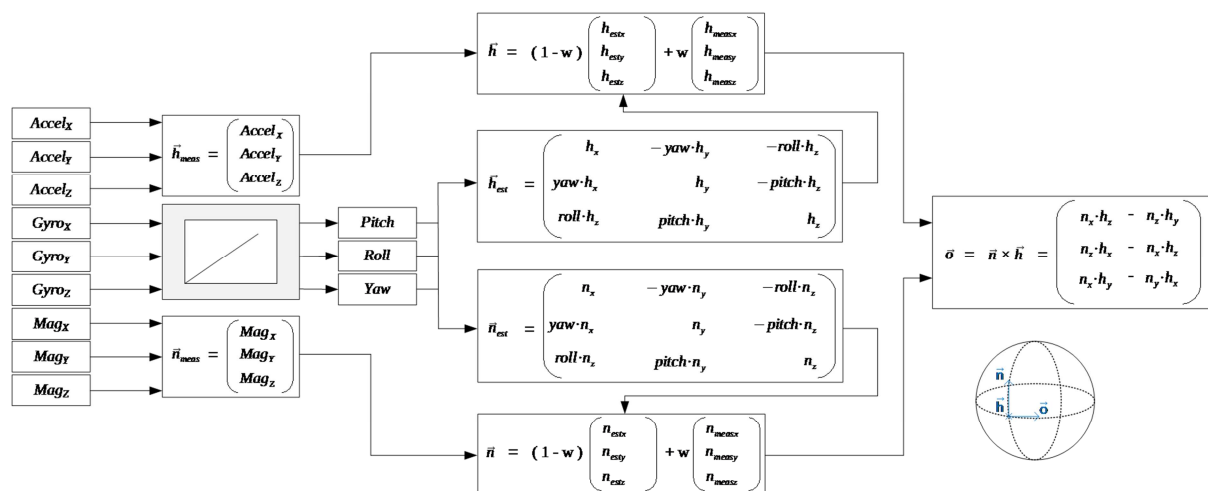


Abbildung 12: Berechnung der Nord-, Ost- und Höhenvektoren in Relation zum KOS



Darüber hinaus wurden die Daten vom House-Keeping analysiert. Der Wert des Energiebedarfs des Systems entsprach mit etwa 33 Wh (einschließlich Vor- und Nachflugphase) der Prognose. Die Innentemperatur des Hauptmoduls unterschritt die 0 °C und damit den geplanten Grenzwert von –30 °C nicht. Bei einer geringen Außentemperatur um 0 °C in Bodennähe ergab sich die maximale Chiptemperatur einiger Bauelemente erwartungsgemäß in der Höhe bei geringem Druck und fehlender Konvektion (Verlustwärme, nicht quantifizierter Einfluss von Solarstrahlung). Eine Aufgabe der Nachbereitung wird die abschließende Analyse des Einflusses der fehlenden Konvektion auf die Messung der Außentemperatur mit dem Mantel-Widerstandsthermometer sein (Thema Eigenerwärmung). Hardwareausfälle wurden keine registriert. Zusammenfassend kann dem System BEXUS-IMUFUSION eine hohe Zuverlässigkeit bescheinigt werden.

## 5. Publikationen über BEXUS-IMUFUSION

- Homepage des Nordhäuser Institutes IAE: <https://www.hs-nordhausen.de/forschung/iae-institut-fuer-informatik-automatisierung-und-elektronik/forschung-im-iae/forschung-und-projekt-bexus-imufusion/>
- Steurer, M.; Goretti, M.; Knappe, J.-F.; Meyer, H.; Müller, J.; Neitzke, K.-P.; Viehmann, M.: BEXUS26 – IMUFUSION: DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL TESTING OF THE FAULT-TOLERANT INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BEXUS-IMUFUSION. 24<sup>th</sup> ESA Symposium on European Rocket & Balloon programmes and related research. Essen, 16-20 June 2019

### Geplant

- Steurer, M., Morozov, A., Janschek, K., Neitzke, K.-P.: Model-based Dependability Analysis of Fault-tolerant Inertial Navigation System: A Practical Experience Report. 21<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, ACA 2019. Cranfield, August 2019
- Steurer, M.; Goretti, M.; Knappe, J.-F.; Meyer, H.; Müller, J.; Neitzke, K.-P.; Viehmann, M.: BEXUS26 – IMUFUSION: DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL TESTING OF THE FAULT-TOLERANT INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BEXUS-IMUFUSION. 3<sup>th</sup> Symposium on Space Educational Activities. Leicester, September 2019
- Viehmann, M.: Operationsverstärker – Grundlagen, Schaltungen, Anwendungen. 2. neubearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, geplant im Frühjahr 2020. (Abschnitt 12.3: Anwendungen im Ballonexperiment BEXUS-IMUFUSION im Kapitel 12: Anwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik)