

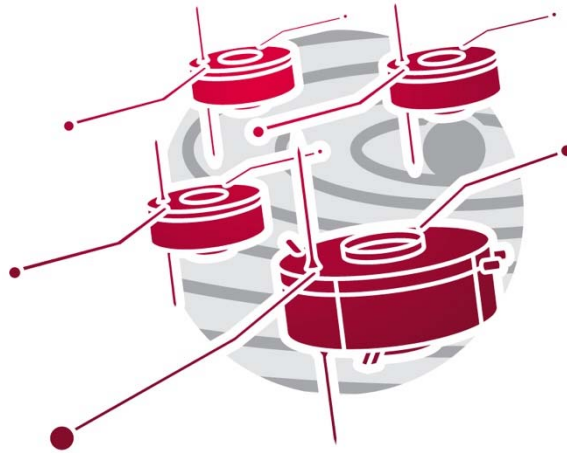
Cluster IV – Magnetfeldexperiment

FK: 50 OC 1803

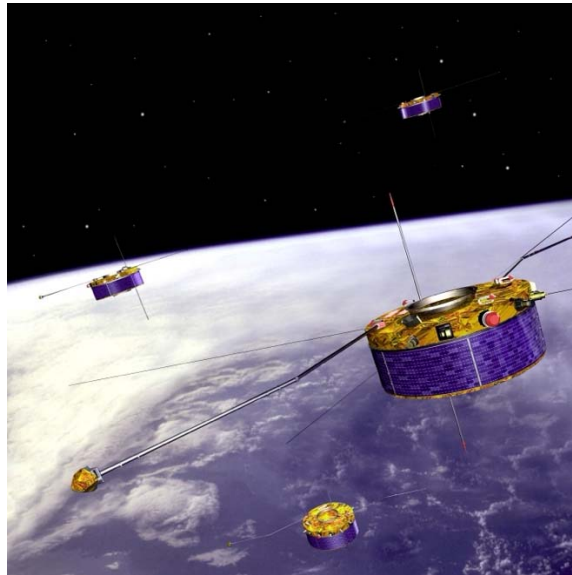
Schlussbericht

Ferdinand Plaschke (ORCID: 0000-0002-5104-6282)

Juni 2024



Cluster mission logo – credit: ESA



credit: ESA - CC BY-SA 3.0 IGO

Cluster IV – Magnetfeldexperiment

Inhaltsverzeichnis

- 1. Kurzdarstellung des Vorhabens**
- 2. Technisch-wissenschaftliche Zielsetzung**
- 3. Rohdatenverarbeitung**
- 4. Projektablauf**
- 5. Technisch-wissenschaftliche Ergebnisse**
- 6. Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen**
- 7. Titelseiten der Veröffentlichungen in Fachzeitschriften**

1. Kurzdarstellung des Vorhabens

CLUSTER ist eine Weltraummission der Europäischen Weltraumagentur ESA, die in internationaler Zusammenarbeit mit der National Aeronautics and Space Administration NASA durchgeführt wird. Die CLUSTER-Mission besteht aus vier identischen Satelliten, die in drei Dimensionen klein- und mesoskalige plasmaphysikalische Prozesse in der Magnetosphäre der Erde untersuchen.

Jeder der vier Satelliten trägt 11 Messinstrumente. Gestartet wurden die Satelliten am 16. Juli und am 9. August 2000 mit Sojus-Fregat-Raketen vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur aus. Das Apogäum der Satelliten liegt bei etwa 127000 km, das Perigäum bei etwa 25000 km. Die Abstände der vier Satelliten wurden den jeweiligen Skalengrößen der zu untersuchenden plasmaphysikalischen Prozesse entsprechend angepasst und variieren zwischen einigen zehn und einigen tausend Kilometern.

Das Hauptinteresse dieses Berichtes gilt dem Fluxgate-Magnetometerexperiment (FGM) an Bord der vier Satelliten. Principal Investigator dieses Experimentes war im Vorhabenzeitraum (2018 bis 2023) Dr. Chris Carr vom Space and Atmospheric Physics Laboratory des Imperial College in London.

Die Lead-Col-Gruppe des Instituts für Geophysik und extraterrestrische Physik (IGEP) der Technischen Universität Braunschweig hat im Rahmen der verabredeten Aufgabenverteilung innerhalb des CLUSTER-Experimentatorenteams folgende Aufgaben übernommen: Entwicklung und Pflege der Rohdatenverarbeitungssoftware für das Cluster-Magnetometer-Experiment, zeitnahe Kalibrierung der CLUSTER-Magnetometer-Daten und Versorgung der Datenzentren mit aktuellen Kalibrierfiles, Aufbereitung hoch aufgelöster Datensätze für eine Vielzahl internationaler Wissenschaftlergruppen, Entwicklung und Anwendung des sogenannten Wellenteleskops und technisch-wissenschaftliche Interpretation der CLUSTER-Beobachtungen physikalischer Prozesse im erdnahen Sonnenwind und in der Magnetosphäre.

Diese Aufgaben wurden in intensiver Zusammenarbeit mit Wissenschaftler*innen des Imperial College in London und dem Institut für Weltraumforschung (IWF) in Graz sowie mit anderen internationalen Gruppen der Scientific Community im Feld der Weltraumphysik durchgeführt.

Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens war das einwandfreie Funktionieren der vier Cluster-Satelliten und die Bereitstellung der Rohdaten der Fluxgate-Magnetometerexperimente durch die ESA.

Das Vorhaben wurde im Rahmen der Cluster-Mission durchgeführt, die von der Bundesrepublik Deutschland finanziell im Wege ihrer Mitgliedschaft bei der ESA unterstützt wird. Die Vorhabenziele dieses Projektes stehen damit im Einklang mit den Förderzielen der Bundesrepublik Deutschland.

Die Ergebnisse des Vorhabens sind von großer Bedeutung für das Verständnis der grundlegenden Eigenschaften von Turbulenz-entwickelnden Systemen, tragen zu einem besseren Verständnis der Dynamik der Magnetosphäre der Erde bei, stellen einen Beitrag zu einer verbesserten Möglichkeit für die Vorhersage des Weltraumwetters dar und werden im weiteren Sinne in dieser Richtung ihre praktische Verwertung finden. Eine direkte Verwertung, z.B. als marktreifes Produkt, ist zurzeit nicht gegeben.

2. Technisch-wissenschaftliche Zielsetzung

Das Hauptziel der CLUSTER-Mission ist die räumliche und zeitliche Untersuchung klein- und mesoskaliger Strukturen in besonders interessanten Plasmaregionen der terrestrischen Magnetosphäre:

- Erdnahe Sonnenwind
- Bugstoßwelle und Magnetosheath-Region
- Magnetopause
- Polare Cuspreionen
- Innere Magnetosphäre
- Erdmagnetischer Schweif
- Polarlichtzone

An der Bugstoßwelle wird der Sonnenwind abgebremst und geht von einem supermagnetosonisch strömenden Plasma in ein submagnetosonisch strömendes Plasma über, bevor er um die Erde herumgeleitet wird. Wesentliche Details der Dynamik der Bugstoßwelle und der Magnetosheath als dem eigentlichen Umströmungsgebiet waren unbekannt, da die dynamischen Prozesse insbesondere durch Plasmawellen und Plasma-Jets bestimmt sind, deren Eigenschaften kaum bekannt waren. Vor der CLUSTER-Mission lagen keine ausreichenden dreidimensionalen Messungen vor, die es mit hinreichender Genauigkeit erlaubt hätten, die räumlichen und zeitlichen Variationen dieser Wellen und Jets sauber voneinander zu trennen.

Ähnliches gilt für die dynamischen Prozesse an der Magnetopause, in der inneren Magnetosphäre und auch im Magnetosphärenschweif. Diese Prozesse sind im Zusammenspiel maßgeblich für das sogenannte Weltraumwetter. Daher ist ein besseres plasmaphysikalisches Verständnis derselben von grundlegender Bedeutung für eine präzise Weltraumwetter-Vorhersage.

Da sich der erdnahe Weltraum immer mehr zum technischen Lebensraum des Menschen entwickelt, ist ein tieferes Verständnis des Weltraumwetters unabdingbar für eine weitere technische Nutzung des Weltraums, beispielsweise durch Kommunikations- und GPS-Satelliten. Die wissenschaftlichen Untersuchungen der CLUSTER-Mission und des Fluxgate-Magnetometer-Experimentes als eines der

Prime-Instrumente an Bord der vier Satelliten sind in diesem Zusammenhang zu sehen.

3. Rohdatenverarbeitung

Die vier Magnetometerexperimente an Bord der Cluster-Satelliten vermessen mit einer Zeitauflösung von etwa 20 Vektoren/Sekunde seit dem Start der Satelliten das Magnetfeld der terrestrischen Magnetosphäre. Die so entstehende gigantische Menge an Rohdaten muss zeitnah gesichtet, in ihrer Qualität bewertet und einer Rohdatenverarbeitung zugeführt werden, die es einer großen Zahl von Wissenschaftler*innen erlaubt, mit den kalibrierten Daten wissenschaftliche Untersuchungen durchführen zu können.

Die Durchführung dieser Aufgabe stellt einen sehr hohen personellen Aufwand dar und erfordert ein sehr tiefes Verständnis der Funktionsweise des FGM-Instruments, möglicher störender Einflüsse durch die Raumfahrzeuge und eine sehr gute Kenntnis der geplanten wissenschaftlichen Untersuchungen. Im Einzelnen wurden folgende Aufgaben vom Team der Technischen Universität im Rahmen dieses Projektes übernommen:

Weiterentwicklung und Pflege der Rohdatenverarbeitungssoftware: Im Rahmen der bisherigen Aufgaben als CLUSTER-Col-Gruppe wurde ein sehr umfangreiches Software-Paket zum Prozessieren der CLUSTER-Magnetfelddaten entwickelt. Dieses Softwarepaket wird in vielen Cluster-Datenzentren zur Erstellung von Summary und Prime Parameter Daten benutzt, um einer großen wissenschaftlichen Öffentlichkeit Zugang zu den CLUSTER-Magnetfelddaten zu ermöglichen. Änderungen der an den Datenzentren verfügbaren Rechnerhardware oder andere Softwareänderungen erfordern immer wieder Updates der CLUSTER Rohdatenverarbeitungssoftware.

Zeitnahe Kalibrierung: Magnetfeldmessungen auf Satelliten sind in der Regel durch Störungen seitens des Raumfahrzeuges bedingt, z.B. aufgrund von Strömen oder Temperaturänderungen. Dies hat zur Folge, dass die CLUSTER-Magnetfeldmessungen einer ständigen Inflight-Kalibrierung unterzogen werden müssen. Diese Kalibrierung ist essenziell für die spätere wissenschaftliche Auswertung. Vereinbarungsgemäß wird diese Kalibrierung von der TU Braunschweig Col-Gruppe durchgeführt (Berechnung der inflight Kalibrierparameter aller acht Magnetometer der vier Satelliten für die Prime-Parameter Datengewinnung und die Archivierung der FGM-Daten). Die erstellten Kalibrierfiles werden dann vom PI-Team gegengeprüft und an die Datenzentren weitergeleitet. Acht Magnetometer sind zu kalibrieren, da jeder der Cluster-Satelliten mit zwei Magnetometern, einem Inboard- und einem Outboard-Magnetometer, ausgestattet ist. So sind Gradientenmessungen möglich, die eine bessere Bestimmung der Störsignale des Satelliten liefern.

Die Kalibriersoftware wird zur Verbesserung der Qualität der täglichen Kalibrierparameter und Vervollständigung der Offset-Statistik zur Überprüfung des technischen Zustandes der Magnetometer ständig weiterentwickelt. Über diese regelmäßige Kalibrierung hinaus werden auf Anfrage und im Rahmen wissenschaftlicher Kooperationen auch spezielle Kalibrierungen interessanter Datensegmente in hoher Zeitaufösung durchgeführt, um so höchstgenaue Detailuntersuchungen durchführen zu können.

4. Projektablauf

An den technisch-wissenschaftlichen Arbeiten waren an der TU Braunschweig beteiligt:

| | |
|-----------------------|---|
| Ferdinand Plaschke | Professor am IGEP, Projektleiter |
| Daniel Heyner | Lehrstuhlvertreter am IGEP, ehemaliger Projektleiter |
| Karl-Heinz Glaßmeier | emeritierter Professor am IGEP, ehemaliger Projektleiter |
| Dragos Constantinescu | Cluster-Wissenschaftler am IGEP (TU Braunschweig) und am Space Research Institute in Bukarest |
| Niklas Grimmich | Doktorand am IGEP |
| Leonard Schulz | Doktorand am IGEP |
| Evelyn Liebert | ehemalige Doktorandin am IGEP (bis 2020) |
| Adrian Pöppelwerth | ehemaliger Masterstudent, jetzt Doktorand am IGEP |
| Yasuhito Narita | Professor am Institut für theoretische Physik (ITP) der TU Braunschweig, ehemals am IWF in Graz |
| Uwe Motschmann | emeritierter Professor am ITP der TU Braunschweig |

Zur Veranschaulichung ist die tägliche Routineverarbeitung der Daten als Flussdiagramm dargestellt. Die Programme sind auf Grund der langjährigen Entwicklung in C, FORTRAN, IDL und PERL geschrieben und benötigen Linux-basierte Server. Die Rohdaten aus dem ESA-Server werden dekommutiert und mithilfe der Log-Files sowohl zu 5-Minuten unkalibrierten Range 2 ASCII-Datenfiles als auch zu sogenannten Range-Change Files gesplittet. Mithilfe des Programm-Paketes [cls.pro] erfolgt im Range 2 die Offsetbestimmung bei niedrigen und wenig variierenden Magnetfeldern [Auswahl durch die Routine findr2]. Range-Changes erfolgen bei höheren Feldern [Auswahl durch die Routine findrc], wobei in den höheren Ranges die Elektronikeinflüsse wie Verstärkungsvariationen und Elektronikoffsets zwischen den Ranges überwiegen.

Aufgrund der Nichtkonstanz dieser Ranges und der damit einhergehenden Kalibrierparameter ist auch eine tägliche Kalibrierung aller 4 Hauptinstrumente (Outboard Sensoren mit ihren Elektronik-Modulen) in allen vorkommenden Ranges erforderlich. Die Kontrolle der Kalibration-Parameter erfolgt manuell [operator

inspection] sowohl durch die [plotrc] Programme als auch durch die spektrale Darstellung [makecal und spectra] eines Tages in der Spinachsenkomponente und in den Spinebenenkomponenten. In diesem iterativen Verfahren werden die bestmöglichen täglichen Kalibrierparameter in den daily-calfiles archiviert und den Datenzentren zur Verfügung gestellt. Diese Vorgehensweise ist im folgenden Flussdiagramm dargestellt.

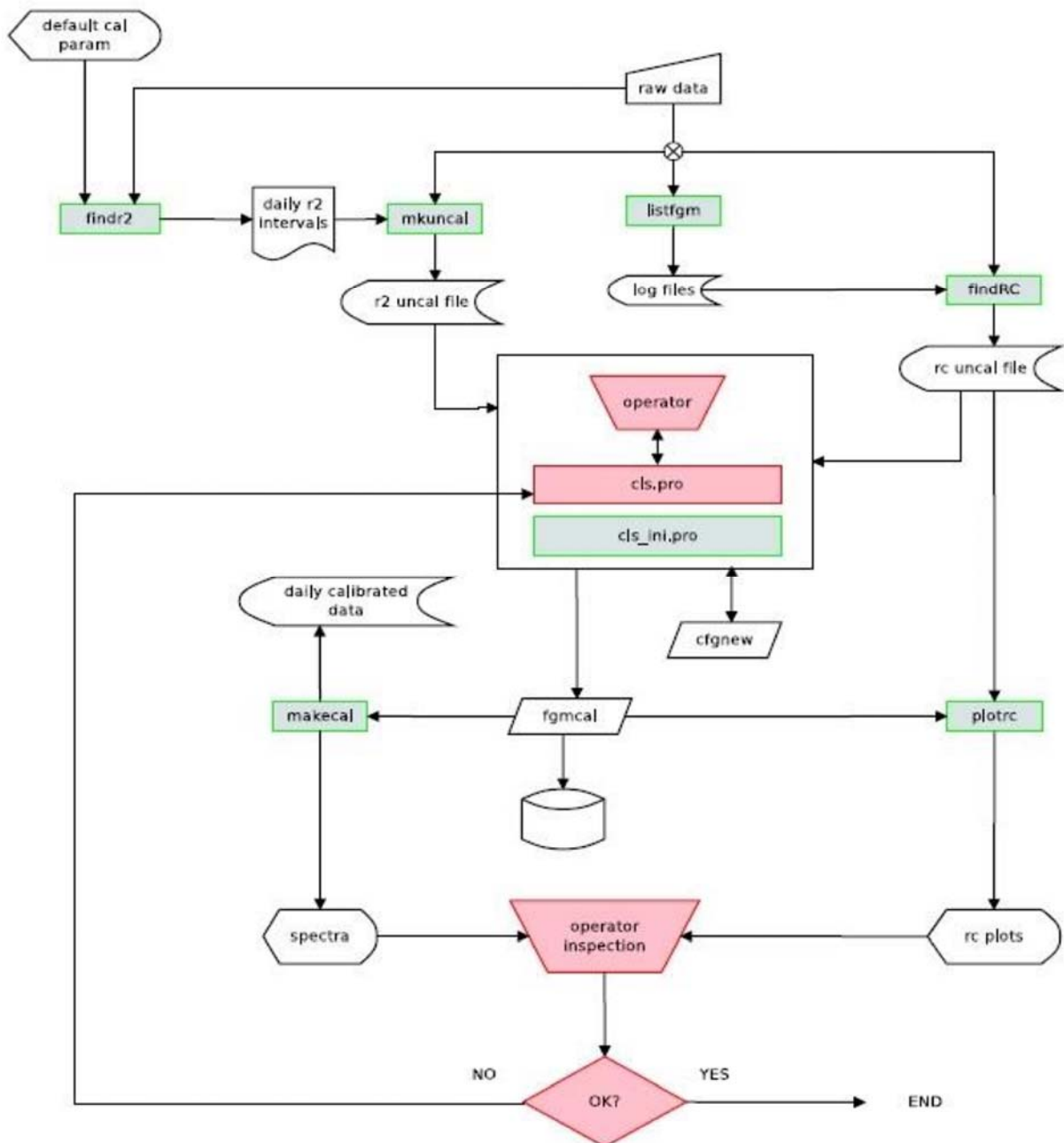


Abbildung 1: Flussdiagramm der Kalibrierprozedur für die acht Cluster-Magnetometer.

Folgende Reisen wurden im Rahmen des Cluster-Projektes durchgeführt, um sowohl den technischen als auch den wissenschaftlichen Aufgaben im Rahmen des Projektes nachkommen zu können:

| | |
|---------------|--|
| Wien: | Besprechung mit den Projektpartnern vom Imperial College London und vom IWF in Graz sowie Vorstellung der technisch-wissenschaftlichen Ergebnisse im Rahmen der EGU-Tagung |
| Braunschweig: | Teilnahme an der DGG-Tagung zur Vorstellung von Cluster-Beobachtungen und technisch-wissenschaftlicher Ergebnisse |
| Stubenberg: | Besprechung zu Kalibrierproblemen und Vorstellung technisch-wissenschaftlicher Ergebnisse im Rahmen des International Magnetometer Workshop |
| Graz: | Kalibrierbesprechung mit dem Grazer CLUSTER-Team |
| Darmstadt: | Vorstellung von Kalibrierergebnissen, Besprechung mit den Projektpartnern und mit ESA-Verantwortlichen insbesondere bezgl. der Übergabe der Projekt-Pflichten an Herrn Plaschke, Vorstellung wissenschaftlicher Cluster-Ergebnisse |
| Znojmo: | Besprechung zu Kalibrierproblemen und Vorstellung technisch-wissenschaftlicher Ergebnisse im Rahmen des International Magnetometer Workshop |

5. Technisch-wissenschaftliche Ergebnisse

Mehrere technisch-wissenschaftliche Studien, an denen Mitglieder des IGeP-Cluster-Teams beteiligt waren und die in den Jahren 2018-2023 eingereicht oder veröffentlicht wurden, sind in referierten und renommierten wissenschaftlichen Zeitschriften erschienen. Eine Auflistung dieser Arbeiten findet sich im Abschnitt 6, die jeweils ersten Seiten dieser Publikationen sind im Abschnitt 7 zusammengefasst. Die Studien sind auch in mehreren wissenschaftlichen Vorträgen auf Fachtagungen, Workshops und Cluster-Meetings dargelegt und vorgestellt worden.

Cluster bietet wegen seiner sehr langen Missionsdauer eine einzigartige Gelegenheit, das Langzeitverhalten der Magnetometersysteme unter den sehr extremen Bedingungen des Weltraums zu testen. Diese Erprobungsmöglichkeit ist nicht nur von Interesse für die Raumfahrttechnik, sondern auch für Beobachtungen unter extremen terrestrischen Bedingungen.

Von 2018 bis 2023 wurden im Rahmen der Daily-Kalibration für die 4 Cluster-Satelliten – einschließlich spezieller Sonnenwindkalibrierungen – mehr als 12500 Kalibrierfiles erstellt. Eine Übersicht gibt die folgende Tabelle:

| Monat/Jahr | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------|--------------|------|------|------|------|------|
| 01 | 175 | 131 | 164 | 155 | 223 | 201 |
| 02 | 146 | 121 | 133 | 133 | 155 | 198 |
| 03 | 155 | 130 | 135 | 144 | 140 | 135 |
| 04 | 157 | 126 | 210 | 189 | 235 | 223 |
| 05 | 165 | 194 | 162 | 130 | 253 | 254 |
| 06 | 159 | 135 | 186 | 186 | 227 | 247 |
| 07 | 130 | 132 | 161 | 193 | 254 | 254 |
| 08 | 134 | 131 | 157 | 164 | 220 | 254 |
| 09 | 126 | 127 | 150 | 177 | 168 | 200 |
| 10 | 132 | 130 | 152 | 253 | 196 | 164 |
| 11 | 128 | 131 | 156 | 218 | 245 | 218 |
| 12 | 130 | 147 | 254 | 192 | 227 | 253 |
| Summe/Jahr | 1737 | 1635 | 2020 | 2134 | 2543 | 2601 |
| Gesamt | 12670 | | | | | |

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Kalibrierungen.

Diese sehr große Anzahl durchgeführter Kalibrierungen erlaubt dann auch eine qualifizierte Untersuchung der Eigenschaften der Magnetometer.

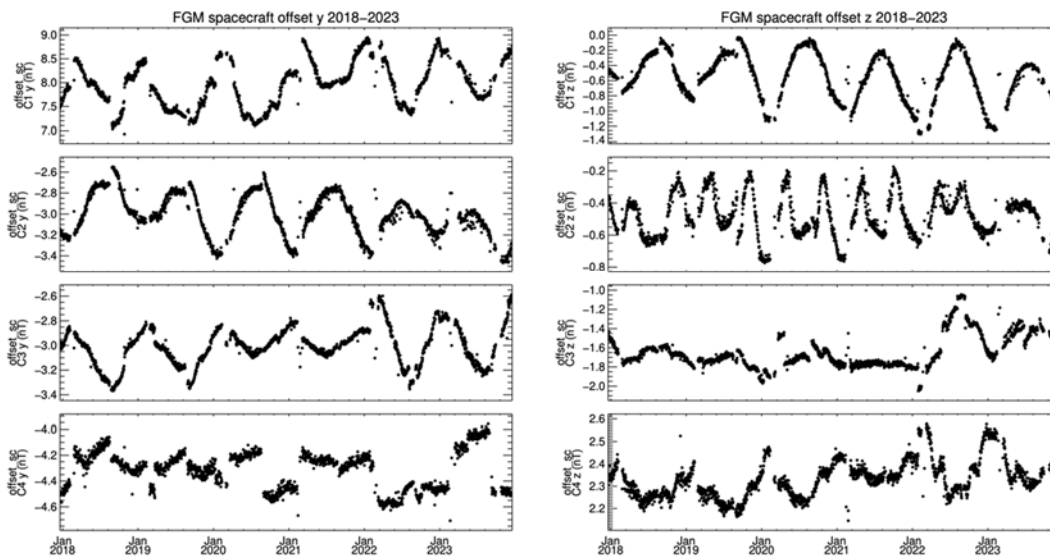


Abbildung 2: Stabilität der Sensor-Offsets.

Alle Ergebnisse im Detail zu beschreiben, würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Einige wichtige Erkenntnisse zum Zustand und der Güte der Magnetometersysteme an Bord der Cluster-Satelliten sollen jedoch angesprochen werden: Anhand der Kalibrierparameter, die kontinuierlich für die Erstellung der Prime Parameter Data in den nationalen Datenzentren erarbeitet wurden, lässt sich die „Gesundheit“ der Magnetometer sehr gut ablesen. Einer der wichtigen Parameter ist der Offset-Wert der Fluxgate-Sensoren. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung dieser

Offsets für den Zeitraum Januar 2018 bis Dezember 2023. Die Stabilität des Offsets ist bemerkenswert und ein Indiz für die technische Qualität der Cluster-Fluxgatemagnetometer. Die saisonalen Änderungen sind auf Temperatureffekte zurückzuführen. Die leichten Schwankungen zeigen deutlich, dass eine ständige Nachverfolgung der Kalibrierung erforderlich ist, um die erforderliche Datenqualität zu gewährleisten.

Demgegenüber ist die Langzeitvariation der Elektronik-Offsets, z.B. bei Cluster 1, deutlich erheblicher (siehe Abbildung 3). Sie zeigt die unbedingte Notwendigkeit einer Kalibrierung je Orbit in den Ranges 4-7. Hier lernen wir, welche Rolle der Sensor-Offset im Vergleich zum Elektronik-Offset spielt. Man beachte, dass fehlende bzw. zeitlich fortgeführte Offsetwerte in den höheren Ranges auf fehlende (bzw. für die Kalibrierung ungeeignete) Beobachtungen in den entsprechenden Messbereichen zurückzuführen sind.

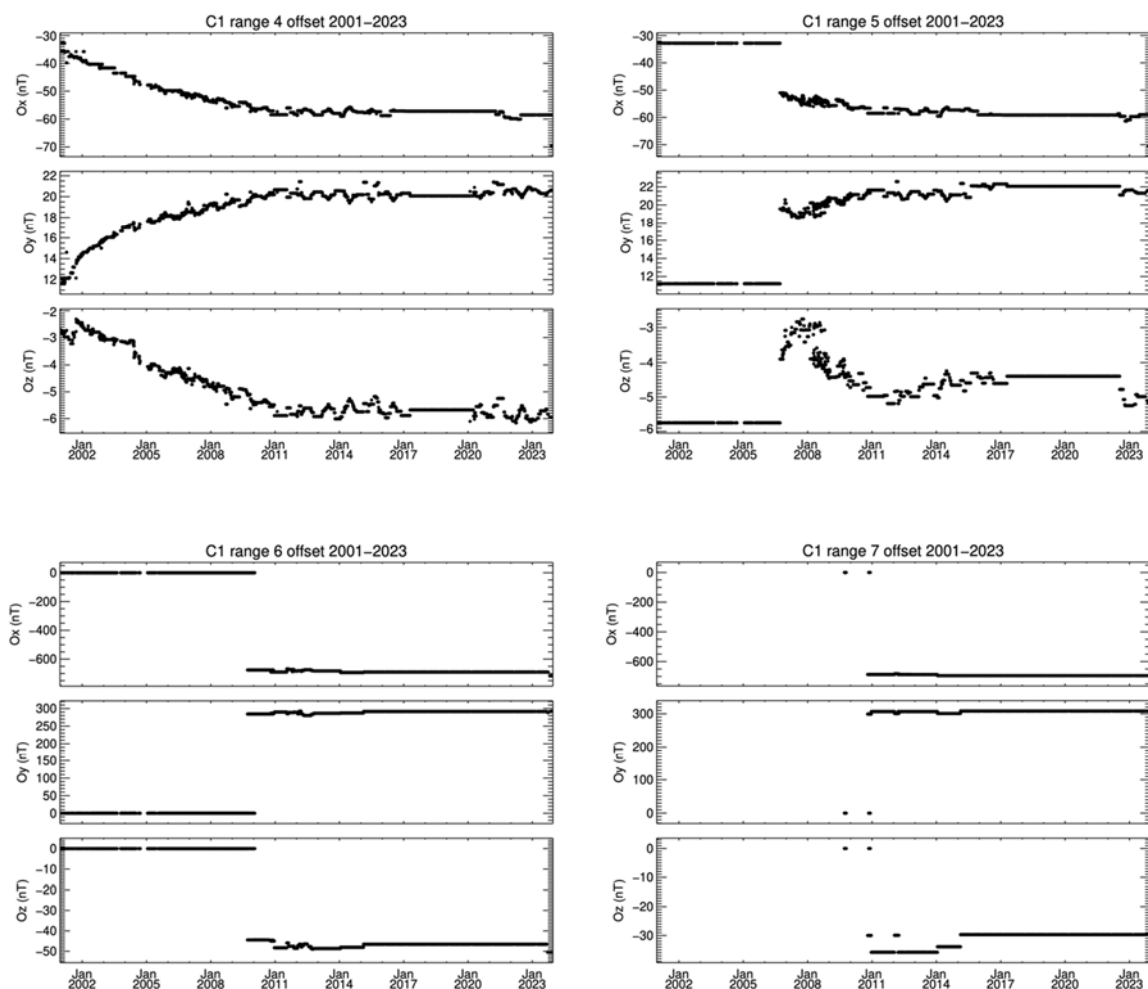


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Elektronik-Offsets in den verschiedenen Ranges des Instrumentes.

Neben der Langzeitstabilität der Offsets sind auch die Langzeitvariationen der Orthogonalitätsfaktoren und der Verstärkungsfaktoren von größtem Interesse und müssen mit großem Aufwand bestimmen werden. Die zeitlichen Variationen dieser Größen sind am Beispiel des Cluster-Satelliten C1 in Abbildung 4 dargestellt. Die Langzeitvariation der genannten Größen zeigt deutlich die Güte der Instrumente, aber auch die Präzision der Kalibrierung.

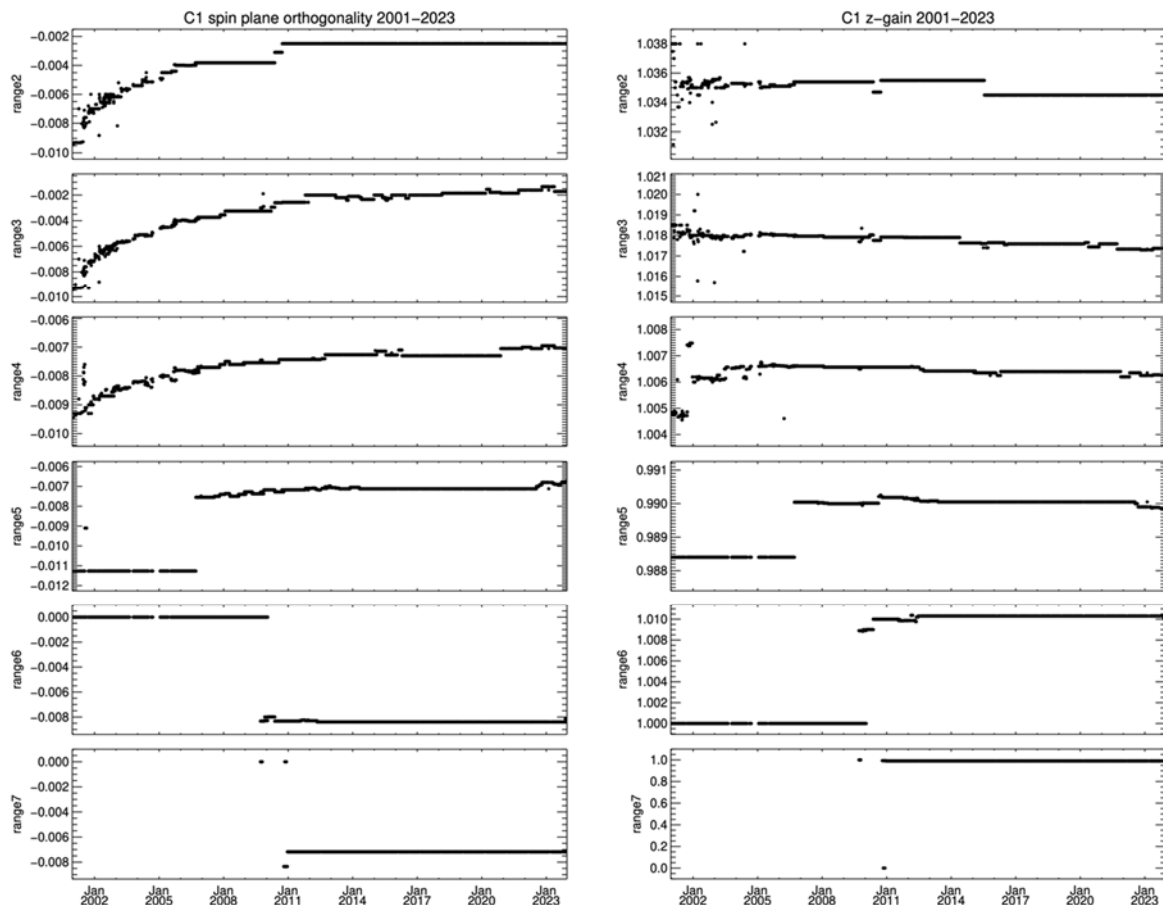


Abbildung 4: Langzeitvariationen der Orthogonalitäts- (links) und Verstärkungsfaktoren (rechts), dargestellt für den Satelliten C1. Die Abweichungen von der Orthogonalität sind in Radian angegeben.

Des Weiteren galt das Augenmerk natürlich der Qualität der Messdaten nach der Kalibrierung. Da insbesondere auch höher-frequente Plasmawellen und räumlich kleinskalige Strukturen untersucht werden, ist es von besonderem Interesse, auch durch den Spin der Raumfahrzeuge erzeugte Störsignale zu eliminieren. Dies geschieht mit zunehmend verfeinerten Verfahren, die sich insbesondere auch die Darstellung der Rohdaten durch dynamische Spektren zunutze machen. Als Beispiel sei in der Abbildung 5 ein solches dynamisches Spektrum vor und nach der Kalibrierung gezeigt. Durch die spezielle Kalibrierung konnten die Spinsignale um 0.5 Hz und insbesondere um 0.25 Hz reduziert werden. Es sei angemerkt, dass die

Spinfrequenzen mit der Zeit herabgesetzt wurden. Entsprechend mussten auch in der Software entsprechende Anpassungen vorgenommen werden.

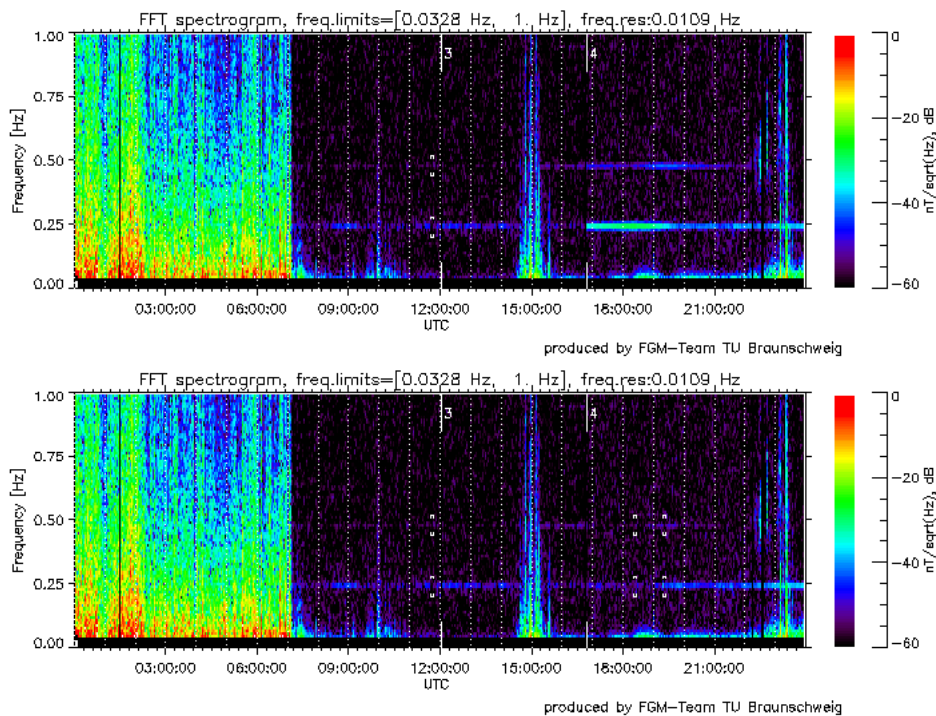


Abbildung 5: Zur Reduktion von spin-harmonischen Störungen durch hochgenaue Kalibrierung. Die obere Abbildung zeigt ein dynamisches Spektrum vor Nutzung der Daily-Calibration Files, die untere nach Re-Kalibrierung mit den Daily-Calibration Files.

Aufgrund von Problemen in der Hardware des Rechners, auf dem die Kalibrierfiles gespeichert sind, und von dem aus diese Files der Scientific Community zur Verfügung gestellt werden, kam es in den Jahren 2021/2022 zum Verlust einiger Monate an Kalibrierergebnissen. Die Ergebnisse/Kalibrierfiles mussten folglich neu hergestellt werden, was mit einem nicht unsignifikanten Mehraufwand verbunden war.

Updates der Kalibrier- und Datenverarbeitungs-Software gehörten und gehören im Cluster-Projekt zum Tagesgeschäft. Zum Anfang des Jahres 2021 trat allerdings ein ungewöhnlicherer Fehler zutage, der korrigiert werden musste: In der ursprünglichen Software wurde angenommen, dass die Jahreszahl nicht über den Wert 2020 hinausgehen sollte, denn bei der ursprünglichen Entwicklung der Software war von einem Ende der Mission vor Erreichen dieses Jahres ausgegangen worden. Der Fehler zeigt folglich, dass Cluster ein sehr erfolgreiches (da weiterhin aktives) Projekt ist! Das Ende der Mission ist im Vorhabenzeitraum noch nicht erreicht worden. Folglich haben in diesem Zeitraum auch die Arbeiten zum Abschluss der operativen Phase des Cluster-Projektes noch nicht begonnen.

Während des Vorhabenzeitraums hat Frau Dr. Liebert ihre Arbeiten zur Struktur des tagseitigen Bugstoßwellen-Stromsystems abgeschlossen. Frau Liebert hat im Jahr 2020 ihre Dissertation an der TU Braunschweig sehr erfolgreich verteidigt und arbeitet nun im Bereich der medizinischen Physik.

Herr Dr. Constantinescu hat seine sehr umfangreichen statistischen Analysen der Eigenschaften von ULF-Wellen in der Erdmagnetosphäre (Aufbau eines virtuellen Observatoriums für ULF-Wellen) im Vorhabenzeitraum durchgeführt und abgeschlossen.

Im Rahmen seiner Masterarbeit hat sich Herr Schulz intensiv mit einem neuen Algorithmus unseres Kollegen Chanteur aus Paris beschäftigt, der zum Ziel hatte, die Bestimmung von Stromdichten in der Magnetosphäre anhand von Cluster-Messungen zu verbessern. Des Weiteren hat sich Herr Leonard Schulz intensiv mit der Methode des Wellenteleskops beschäftigt, das speziell zur Auswertung von Cluster-Multisatellitendaten entwickelt wurde. Bei diesen Arbeiten ist auch die Frage des Auflösungsvermögens des Wellenteleskops wieder deutlich geworden und als wesentlich erkannt worden. Ein Paper dazu wurde von Herrn Schulz im letzten Jahr (2023) veröffentlicht.

Auf Einladung der Cluster-Projektleitung und des J. Geophys. Res. wurde ein Review zur Wellenteleskopmethode gemeinsam von Herrn Prof. Dr. Yasuhito Narita, Prof. Dr. Uwe Motschmann und Prof. Dr. Karl-Heinz Glaßmeier erstellt und veröffentlicht. Dieses Review macht noch einmal deutlich, dass die vier Magnetometersysteme der Cluster-Satelliten ein einzigartiges Instrument an sich darstellen.

Gegen Ende des Jahres 2022 wurde Herr Niklas Grimmich durch Herrn Dr. Constantinescu in die Kalibrier-Software und Prozesse eingearbeitet. Herr Grimmich hat die Kalibrier-Arbeiten von Herrn Constantinescu dann ab dem Jahreswechsel 2022/2023 übernommen. Wissenschaftlich beschäftigt sich Herr Grimmich mit extremen Bewegungen der Erd-Magnetopause, die insbesondere in höheren Breiten durch Cluster-Multipunktmessungen hervorragend bestimmt und charakterisiert werden können. Herr Grimmich hat mit einem machine learning Ansatz einen äußerst umfangreichen Cluster-Magnetopause-Datensatz gewonnen und veröffentlicht. Die wissenschaftliche Auswertung dazu ist bei Annales Geophysicae zur Begutachtung eingereicht worden.

Herr Adrian Pöppelwerth hat im Rahmen seiner Masterarbeit einen Datensatz in der Magnetosheath identifizierter Plasmajets aus Cluster-Messdaten gewonnen, analysiert und publiziert. Die Veröffentlichung ist in diesem Jahr in Frontiers in Astronomy and Space Sciences erschienen.

6. Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen

Dissertationen

Liebert, E. (2021), Stromsysteme der tagseitigen Erdmagnetosphäre: eine statistische Untersuchung anhand von Cluster-Satellitendaten, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, doi:10.24355/dbbs.084-202102241155-0.

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften

Narita, Y., K.-H. Glassmeier, and U. Motschmann (2022): The Wave Telescope Technique, *J. Geophys. Res.*, 127, 2, e2021JA030165, doi:10.1029/2021JA030165.

Constantinescu, O. D., K. H. Fornaçon, U. Motschmann, K. H. Glassmeier, I. Richter, and F. Plaschke (2023), The Cluster Virtual Observatory for ULF Waves, *J. Geophys. Res.*, 128, 9, e2022JA031254, doi:10.1029/2022JA031254.

Schulz, L., K.-H. Glassmeier, F. Plaschke, S. Toepfer, and U. Motschmann (2023), The m-dimensional spatial Nyquist limit using the wave telescope for larger numbers of spacecraft, *Ann. Geophys.*, 41, 2, 449-463, doi:10.5194/angeo-41-449-2023.

Pöppelwerth, A., F. Koller, N. Grimmich, D. Constantinescu, G. Glebe, Z. Vörös, M. Temmer, C. Simon Wedlund, and F. Plaschke (2024), Cluster: List of plasma jets in the subsolar magnetosheath, *Front. Astron. Space Sci.*, 11, 1388307, doi:10.3389/fspas.2024.1388307.

Grimmich, N., F. Plaschke, B. Grison, F. Prencipe, C. P. Escoubet, M. O. Archer, O. D. Constantinescu, S. Haaland, R. Nakamura, D. G. Sibeck, F. Darrouzet, M. Hayosh, and R. Maggiolo (2024), The Cluster spacecraft's view of the motion of the high-latitude magnetopause, *EGUsphere* [Ann. Geophys. preprint], doi:10.5194/egusphere-2024-1087.

Veröffentlichte wissenschaftliche Datensätze

Pöppelwerth, A., F. Koller, F. Plaschke, N. Grimmich, D. Constantinescu, G. Glebe, Z. Vörös, M. Temmer, and C. Simon Wedlund (2024), Database: cluster - subsolar magnetosheath jet data 2000-2023, doi:10.17605/OSF.IO/XVDY6.

Grimmich, N., F. Plaschke, B. Grison, F. Prencipe, C. P. Escoubet, M. O. Archer, O. D. Constantinescu, S. Haaland, R. Nakamura, D. G. Sibeck, F. Darrouzet, M. Hayosh, and R. Maggiolo (2024), Database: Cluster Magnetopause Crossings between 2001 and 2020, doi:10.17605/OSF.IO/PXCTG.

7. Titelseiten der Veröffentlichungen in Fachzeitschriften

Aus Gründen des Copyrights sind nicht alle Titelseiten in der Berichtsversion für die Technische Informationsbibliothek in Hannover aufgeführt.

Berichtsblatt

| | |
|---|--|
| 1. ISBN oder ISSN | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht |
| 3a. Titel des Berichts CLUSTER IV – Magnetfeldexperiment | |
| 3b. Titel der Publikation | |
| 4a. Autor(en) des Berichts [Name(n), Vorname(n)] Plaschke, Ferdinand | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023 |
| 4b. Autor(en) der Publikation [Name(n), Vorname(n)] | 6. Veröffentlichungsdatum 07.11.2024 |
| | 7. Form der Publikation Eigenverlag |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik Technische Universität Braunschweig Mendelssohnstraße 3 38106 Braunschweig | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 50 OC 1803 |
| | 11a./11b. Seitenzahl Bericht/Publikat. 23 |
| 13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn | 12. Literaturangaben 8 |
| | 14. Tabellen 1 |
| | 15. Abbildungen 5 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek, Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover, 7. November 2024 | |
| 18. Kurzfassung CLUSTER ist eine internationale Satellitenmission, die gemeinsam von der ESA und der NASA durchgeführt wird. An Bord der vier CLUSTER Satelliten befinden sich Fluxgate-Magnetometer-Experimente, die unter der Konsortialführung des Imperial College in London betrieben werden. Im Rahmen der vertraglich verabredeten Zusammenarbeit hat das Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik der Technischen Universität Braunschweig die Aufgabe übernommen, die Verarbeitung der Rohdaten der Magnetometerexperimente durchzuführen und wissenschaftlich verwertbare Messdaten der internationalen <i>scientific community</i> zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren wurden in größerem Umfang technisch-wissenschaftliche Studien zu verschiedenen Fragestellungen im Rahmen der Untersuchung der Dynamik der Erdmagnetosphäre und des Weltraumwetters durchgeführt. Insbesondere wurde die Methode des Wellenteleskops weiterentwickelt sowie Multi-Satelliten-Untersuchungen zu ULF Wellen und Stromsystemen in der Magnetosphäre, zu extremen Magnetopausen-Bewegungen, und zu Plasma-Jets in der Magnetosheath sehr erfolgreich zum Abschluss gebracht. | |
| 19. Schlagwörter Magnetfeldmessungen, Magnetometer, Magnetosphäre, Cluster, Weltraumwetter | |
| 20. Verlag Eigenverlag, TU Braunschweig | 21. Preis ----- |

Document Control Sheet

| | |
|--|--|
| 1. ISBN or ISSN | 2. Type of Report Final Report |
| 3a. Report Title CLUSTER IV – Magnetfeldexperiment | |
| 3b. Title of Publication | |
| 4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Plaschke, Ferdinand | 5. End of Project 31.12.2023 |
| 4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) | 6. Publication Date 07.11.2024 |
| | 7. Form of Publication Self-published |
| 8. Performing Organization(s) (Name, Address) Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik Technische Universität Braunschweig Mendelssohnstraße 3 38106 Braunschweig | 9. Originator's Report No. |
| | 10. Reference No. 50 OC 1803 |
| | 11a./11b. No. of Pages Report/Publ. 23 |
| 13. Sponsoring Agency (Name, Address) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn | 13. No. of References 8 |
| | 14. No. of Tables 1 |
| | 15. No. of Figures 5 |
| 16. Supplementary Notes | |
| 17. Presented at (Title, Place, Date) Technische Informationsbibliothek, Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover, 7. Juni 2024 | |
| 18. Abstract CLUSTER is an international satellite mission carried out jointly by ESA and NASA. Fluxgate magnetometer experiments are on board of the four Cluster spacecraft; the experiments are operated under the consortium leadership by the Imperial College in London. As part of the contractually agreed collaboration, the Institute of Geophysics and Extraterrestrial Physics at the Technische Universität Braunschweig has taken on the task of processing the raw data from the magnetometer experiments and making scientifically usable measurement data available to the international scientific community. In addition, a larger number of technical and scientific studies were carried out on various issues relating to the investigation of the dynamics of the Earth's magnetosphere and space weather. In particular, the method of the wave telescope was further developed and multi-satellite studies on ULF waves and current systems in the magnetosphere, on extreme magnetopause movements, and on plasma jets in the magnetosheath were successfully completed. | |
| 19. Keywords Magnetic field measurements, magnetometer, magnetosphere, Cluster, space weather | |
| 20. Publisher Self-published, TU Braunschweig | 21. Price ----- |