

EDRS - BETRIEB DER DATENAUTOBAHN IM WELTALL

G. Rossmanith, V. Schwarz, J. Dalhoff, F. Jaus, J. Scharringhausen,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Wesslinger Str. 20, 82234 Weßling

Zusammenfassung

Das Europäische Datenrelaissatellitensystem (European Data Relay Satellite System, EDRS) ist eine kommerzielle Raumfahrtmission mit dem Ziel, niedrig fliegenden Satelliten eine einzigartige Hochgeschwindigkeits-Datenverbindung zum Boden anzubieten. Dies wird am heutigen Satellitenmarkt immer wichtiger: Durch die ständig anwachsende Anzahl an Satelliten im Orbit kombiniert mit ebenfalls ansteigenden Datenmengen, welche zur Erde übertragen werden müssen, werden immer höhere Datenübertragungsraten benötigt. Diese Datenmengen werden klassischerweise über Bodenstationen im Radiofrequenzbereich (z.B. Ka-, S-, oder X-Band) zur Erde übertragen. Die Zeit eines Überfluges über einer Bodenstation ist jedoch auf wenige Minuten begrenzt. Darüber hinaus muss abgewartet werden, bis der Satellit eben diese Bodenstation überfliegt – was im Fall von zeitkritischen Daten den Nutzen schmälern oder sie gänzlich unbrauchbar machen kann. An diesen zwei Problemen setzt das Konzept von EDRS an: Satelliten im geostationären Erdorbit dienen als Relais-Station, und sind somit für niedrig fliegende Satelliten für nahezu die Hälfte ihres Orbits erreichbar. Zusätzlich wird die Datenübertragung von Satellit zu Satellit per Laser durchgeführt, was eine schnelle Datenrate und eine hohe Abhörsicherheit ermöglicht.

Aktuell besteht EDRS aus zwei geostationären Knoten: EDRS-A ist eine Nutzlast auf dem Eutelsat-9B Satelliten, welcher 2016 gestartet wurde. Drei Jahre später hatte EDRS-C seinen Launch. Dieser besteht im Gegensatz zu EDRS-A aus einem eigenständigen, dedizierten Satelliten. Beide Komponenten werden vom Deutschen Raumfahrtkontrollzentrum (German Space Operations Center, GSOC) betrieben, welches Teil des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist. Das EDRS Programm selbst ist ein Public Private Partnership zwischen der ESA und Airbus Defence and Space als Hauptvertragspartner der Industrie. Die für die Datenverbindung benutzten Laser Communication Terminals (LCTs) wurden von der Firma TESAT Spacecom entwickelt und hergestellt. Beim Satellitenbus von EDRS-C handelt es sich um die SmallGEO Plattform, welche von OHB produziert wird. Zusätzlich zur Hauptnutzlast, bestehend aus den LCTs, ist noch ein Ka-Band Transponder sowie ein Strahlungsmonitor Teil der EDRS Mission.

Das EDRS System ist in der aktuellen Form in der Lage, bis zu 200 Datenverbindungen pro niedrig fliegendem Satellit pro Tag zu unterstützen. Bis Anfang nächsten Jahres werden sieben Kunden-Satelliten sowie eine Ka-band Antenne auf dem Columbus-Modul der Internationalen Raumstation ISS den Service von EDRS genutzt haben. Diese hohe Anzahl an Nutzern und die hohen technischen und organisatorischen Anforderungen stellen den Betrieb am GSOC vor hohe Herausforderungen.

Dieses Paper gibt einen Überblick über die EDRS Mission, mit einem Fokus auf das Betriebskonzept und dessen Entwicklungen aus Perspektive des GSOC.

1. GRUNDLAGEN

Der Raum um unsere Erde ist immer dichter belegt: Schon längst sind Raketenstarts keine Besonderheit; mehr und mehr Satelliten werden in den Erdorbit befördert. Vor allem die Zahl der Satelliten, welche die Erde im *nahen* Orbit (Low Earth Orbit, LEO) umkreisen und beobachten, nimmt stetig zu. Es gibt jedoch nicht nur immer mehr Satelliten im Weltraum, sondern sie alle produzieren auch Aufnahmen und Messungen in höherer Qualität als je zuvor [1]. Diese Entwicklung ist im Grunde die gleiche wie die aus dem ganz alltäglichen Bereich der Mobiltelefone, deren Kameras in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht haben, und Bilder von immer besserer Qualität produzieren. Bei Handys wie auch Satelliten entstehen durch diese Qualitätsfortschritte immer größere Datenmengen. Bei LEO-Satelliten besteht ein großer Teil dieser Daten aus

Bildern der Erdoberfläche – unter Verwendung verschiedener Teile des elektromagnetischen Spektrums – und aus Messungen aller Art, wie zum Beispiel Strahlungsmessungen oder Quantifizierungen des Erdschwerefelds.

Aufgrund all dieser an sich positiven Entwicklung einer stärkeren Nutzung des Weltraumes haben Satelliten allerdings auch mit einem Engpass zu kämpfen: Der Herausforderung, die riesigen Datenmengen vom Weltraum zur Erde zu übertragen – und das vorzugsweise in einem akzeptablen Zeitrahmen, bevor die Daten zu alt werden, um nützlich zu sein.

In diesem Rahmen gibt es zwei Konzepte, die eine Lösung für diese Problematik darstellen können: Einerseits der Ansatz von Relaissatelliten, sowie andererseits die Nutzung von Laserkommunikation, also Kommunikation im optischen Frequenzbereich. Eine Kombination dieser beiden Konzepte findet sich in der Mission des

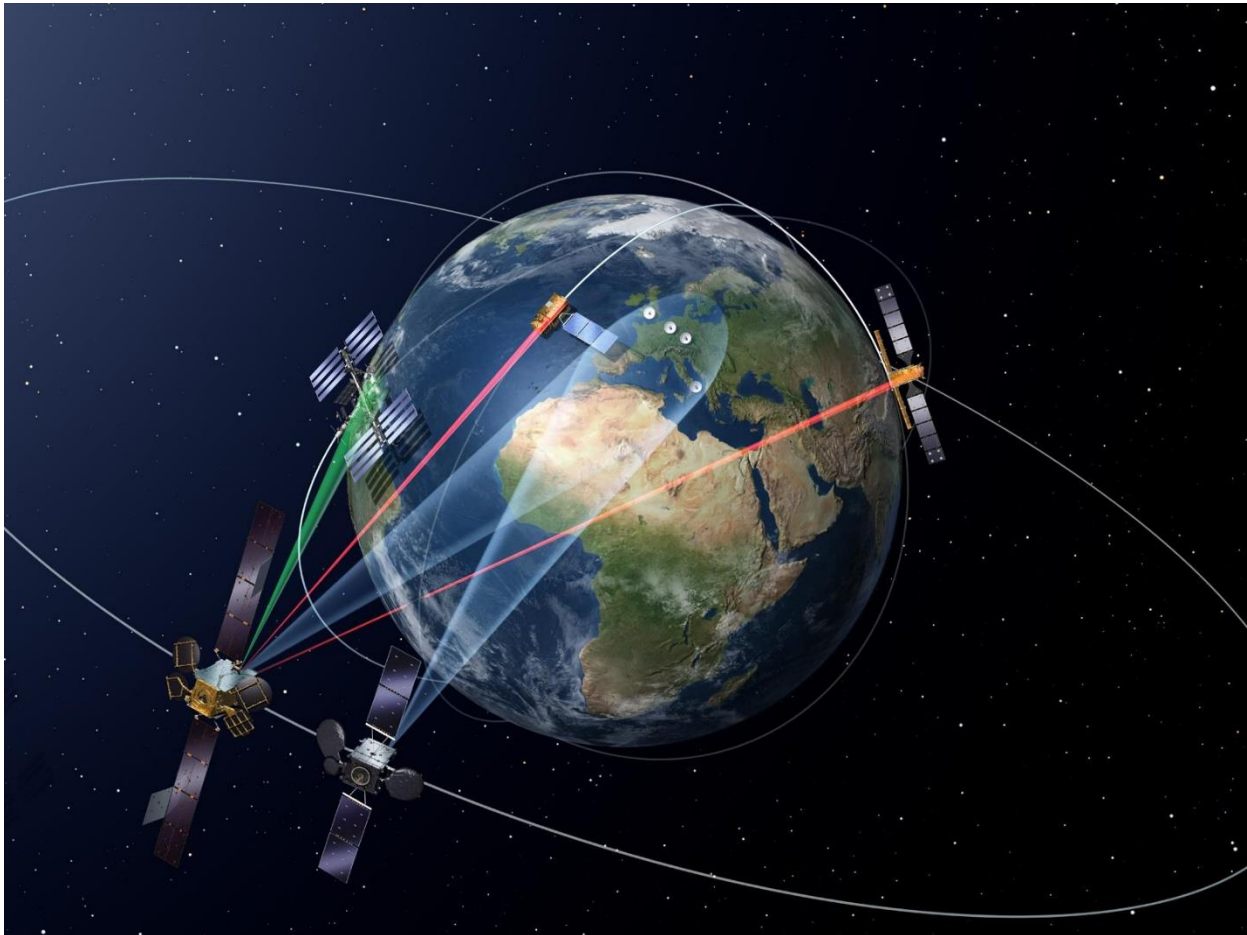


Bild 1: Der aktuelle Stand des SpaceDataHighway: EDRS-A und EDRS-C decken die Hemisphäre über Europa und Afrika ab. Der Datenrelais-Service (rote Linien: optische Frequenzen, grüne Linie: Funkfrequenzen) wird von mehreren LEO-Kunden genutzt, während die Daten an Bodenstationen in ganz Europa weitergeleitet werden (weiße Linien). (Courtesy of Airbus)

Europäischen Datenrelaissatellitensystems (European Data Relay Satellite System, EDRS, dargestellt in Abbildung 1).

Das Konzept eines Relaissystems beschreibt im Rahmen von EDRS die Verwendung eines geostationären (GEO) Satelliten. Dieser kann von den LEO-Kunden genutzt werden, um ihre Daten an einen Empfänger auf der Erde zu leiten. Im Vergleich zur direkten Übertragung zu einer Bodenstation, liegt der große Vorteil in der deutlich höheren Verfügbarkeit. Vom LEO-Satelliten aus gesehen beträgt die Sichtbarkeit zum GEO-Satelliten praktisch die Hälfte jeder (LEO-) Umlaufbahn, und ist damit drastisch höher als die Sichtbarkeit einer Empfangsstation auf dem Boden. Deren Überflugszeit beträgt gerade einmal wenige Minuten. Diese erhöhte Sichtbarkeit eines Relaissatelliten ermöglicht einerseits längere Kommunikationszeiten – und damit mehr übertragene Daten – sowie andererseits kürzere Zeiträume zwischen der Erstellung der Daten (also der Aufnahme eines Bildes oder der Messung gewisser Werte) und dem Empfang dieser Daten am Boden. Der Datensatz ist also früher verfügbar als der, der über eine Bodenstation heruntergeladen wird. [2-5]

Das zweite Konzept, die Laserkommunikation, beschreibt die Übertragung von Informationen über die optischen Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums. Derzeit

sind Funkfrequenzen zwar noch die gängigste Art der Datenübertragung im Weltraum, aber schon längst gibt es eine Vielzahl von Investitionen, Fortschritten, und auch Anwendungen im Bereich der optischen Frequenzen [6]. Laserkommunikation bietet im Allgemeinen die Möglichkeit höherer Übertragungsraten als die Radiofrequenz. Einfach ausgedrückt stehen mehr elektromagnetische Wellen pro Längeneinheit zur Verfügung, welche moduliert werden und damit Informationen transportieren können [2-5].

An sich ist ein Relaissatellit ein eigenständiges Konzept, und kann ohne die Anwendung von Laserkommunikation verwendet werden. Jedoch führt die Kombination von beiden zu erheblichen Vorteilen. Insbesondere ist hervorzuheben, dass sich optische Kommunikation hervorragend für Satellit-zu-Satellit-Verbindungen eignet, da hierbei keine störenden Effekte der Atmosphäre vorliegen, wie es bei Verbindungen direkt zum Boden der Fall wäre. Allerdings wird Laserkommunikation auch für diese Direktverbindungen erfolgreich genutzt [7].

Das Deutsche Raumfahrtkontrollzentrum (German Space Operation Center, GSOC) in Oberpfaffenhofen bei München ist Teil des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Abbildung 2 zeigt dessen größten Kontrollraum K1. Das GSOC betreibt bereits mehrere Satelliten, die Laserkommunikations-Technik in ihrer



Bild 2: Der Haupt-Kontrollraum K1 des Deutschen Raumfahrtkontrollzentrums (German Space Operation Center, GSOC).

täglichen Arbeit nutzen. Diese Missionen decken hierbei ein breites Spektrum an ganz unterschiedlichen Aufgaben ab: So wurden mit dem TerraSAR-X-Satelliten sowohl LEO-LEO- als auch LEO-Boden-Verbindungen durchgeführt [8,9,12]. Im Gegensatz zu diesem 1,2 Tonnen schweren Satelliten zielt die CubeL-Mission (auch PIXL-1 genannt) auf LEO-Ground-Links ab, welche von einem Cubesat aus durchgeführt werden [21,22]. Die Mission TDP-1 ("Technology Demonstration Payload No.1"), ein Vorläufer von EDRS, nutzt wiederum ein Terminal auf dem geostationären Satelliten Alphasat, um experimentelle LEO-GEO-Verbindungen herzustellen [3,10,11,12]. Die gleiche Verbindung bietet schlussendlich das EDRS-Projekt an, dies allerdings als Teil eines in seiner Art einzigartigen kommerziellen Services. Dieser Service zeichnet sich durch hohe Anforderungen an die Robustheit der Übertragung vom LEO-Kundensatelliten zum Boden aus [12-18].

2. DIE EDRS MISSION

Das EDRS-Projekt ist eine öffentlich-private Partnerschaft (Public-Private Partnership, PPP) zwischen der ESA und Airbus Defence and Space als Hauptauftragnehmer sowie Betreiber des Systems im Rahmen des ARTES-7 Programms (Advanced Research in Telecommunications Systems). Das DLR ist für wesentliche Teile des Bodensystems verantwortlich. Die Mission wird auch als *SpaceDataHighway* bezeichnet, welcher als *Daten-Autobahn im Weltall* übersetzt werden könnte. Dieser

Ausdruck soll hierbei die Idee eines Hochgeschwindigkeits-Datenübertragungsdienstes, welcher außerhalb unserer Atmosphäre operiert, widerspiegeln.

Derzeit besteht EDRS aus zwei geostationären Knoten: EDRS-A und EDRS-C. Bis vor kurzem war geplant, dass diese beiden Satelliten bis Anfang 2024 als Kommunikationsrelais für neun Kunden auf LEO-Seite dienen. Aufgrund des fehlgeschlagenen Starts des zweiten Flugs der Vega C von Arianespace am 20. Dezember 2022 [19] sind zwei dieser Kunden, nämlich Pléiades Neo (PNEO) 5 und 6, vorerst nicht mehr Teil der Kundengruppe. Dennoch gibt es insgesamt sieben LEO-Kunden, die EDRS in naher Zukunft nutzen werden. Sechs davon verwenden das Relaisystem bereits jetzt. Weitere Nutzer des Programms sind in Planung.

EDRS-A stellt hier keinen eigenen Satelliten dar, sondern besteht aus zwei Nutzlasten an Bord des GEO-Satelliten Eutelsat-9B, welcher im Januar 2016 gestartet wurde. Die Hauptnutzlast von EDRS-A ist ein so genanntes Laser Communication Terminal (LCT), welches von der Firma TESAT Spacecom aus Backnang entwickelt und hergestellt wurde. Dieses ist für die Datenübertragung im optischen Frequenzbereich verantwortlich und erreicht Übertragungsgeschwindigkeiten von bis zu 1,8 Gbps. Als sekundäre Nutzlast ist außerdem noch eine Ka-Band Antenne an Bord. Im Grunde stellt diese Antenne einen gleichwertigen Relaisdienst wie sein optisches Gegenstück bereit, wenn auch mit niedrigeren Übertragungsgeschwindigkeiten.

	via EDRS-A	via EDRS-C	Summe
Anzahl erfolgreiche Links	64.171	8.187	72.358
Reine Kommunikationszeit in Minuten	932.499	117.291	1.049.790
Übertragene Daten in Terabyte	3.797	423	4.220

TAB 1: Die wichtigsten Performance-Indizes von EDRS, aufsummiert über die gesamte Missionslaufzeit bis einschließlich 06.07.2023.

EDRS-C ist im Gegensatz zu EDRS-A ein eigenständiger Satellit im geostationären Orbit, und wurde im August 2019 gestartet. Er basiert auf der von OHB entwickelten SmallGEO-Plattform. Wie EDRS-A hat auch dieser Satellit ein LCT an Bord. Daneben verfügt EDRS-C über zwei weitere sekundäre Nutzlasten: die Ka-Band-Nutzlast HYLAS-3 von Avanti, die einen kommerziellen Kommunikationsdienst anbietet, sowie den Next Generation Radiation Monitor (NGRM) der ESA. Beide EDRS-Satelliten decken die Hemisphäre über Europa ab, mit einer Position bei 9° Ost bzw. 31° Ost.

Vier der oben genannten sieben (teilweise zukünftigen) Kunden von EDRS sind die LEO-Satelliten der Sentinel-Missionen. Diese sind Teil des Copernicus-Programms der Europäischen Union. Derzeit befinden sich drei von ihnen (Sentinel-1A, -2A und -2B) in der Umlaufbahn und nutzen EDRS für ihre Daten-Downlinks. Ein weiterer (Sentinel-1B) war bis Ende 2021 Teil des SpaceDataHighway. Der neueste EDRS-Kunde, Sentinel-1C, soll Anfang 2024 starten.

Ein weiterer aktueller Kunde ist das Columbus-Labor auf der Internationalen Raumstation (ISS), das den Relaisdienst auf EDRS-A über die Ka-Band-Antenne nutzt. Die letzten beiden Kunden von EDRS sind die Satelliten Pléiades NEO 3 und 4, die im April bzw. August 2021 gestartet wurden. Genau wie das Columbus-Labor nutzen diese Satelliten ebenfalls den Ka-Band-Relaisdienst.

Die schon weiter oben erwähnte Illustration des SpaceDataHighway (Bild 1) zeigt die zwei Knoten EDRS-A und EDRS-C über Europa bzw. Afrika, gemeinsam mit drei Nutzern: Zwei LEO-Satelliten sowie dem Columbus-Modul der ISS.

3. BISHERIGE ERFAHRUNGEN IM PROJEKT

Der laufender Betrieb von EDRS umfasst mehrere komplexe Teilaufgaben, welche von verschiedenen Parteien als Teil einer gemeinsamen Mission wahrgenommen werden. Hierbei ist das GSOC ein zentraler Bestandteil. Es erfüllt es in diesem Rahmen zwei Hauptaufgaben:

Für EDRS-A ist das GSOC mit der Rolle des so genannten Devolved Payload Control Center (DPCC) betraut. Diese Aufgabe beinhaltet den gesamten Betrieb des LCT sowie der Ka-Band-Antenne an Bord des Eutelsat-9B. Die Kommandoprodukte werden am GSOC erstellt und an das EDRS-A Kontrollzentrum von Eutelsat geschickt. Von dort aus findet die tatsächliche Kommandierung des EDRS-A Satelliten statt. Bei EDRS-C wird diese Rolle auf den

Betrieb des gesamten Satelliten ausgedehnt, d.h. das GSOC ist in diesem Fall als Satellitenkontrollzentrum (Satellite Control Center, SCC) für den vollständigen Betrieb des Satelliten verantwortlich und steht selbst in direkter Kommunikation mit diesem.

Ein Teil des Betriebs, nämlich der Empfang von Link-Anfragen für Laser- wie auch Ka-Band-Links, wäre aufgrund ihrer hohen Anzahl nicht händisch möglich. Aus diesem Grund wurde am GSOC eine umfangreiche Software erstellt, welche die Verarbeitung dieser Linkanfragen vollkommen automatisch durchführt [14-16]. Diese Aufgabe umfasst den gesamten Ablauf des Uplink der Kommandos und die Überwachung deren Ausführung, sowie die Kontrolle der Telemetrie inklusive automatischer Reaktionen auf gewisse Abweichungen. Die Software ist, wie auch die Telemetrie der Satelliten selbst, unter ständiger Überwachung durch Mitglieder des Betriebsteams.

Für EDRS-A wie auch EDRS-C hat das GSOC eine direkte Schnittstelle zum Mission Operations Center (MOC) in Ottobrunn, das in der Verantwortung von Airbus Defence and Space liegt. Im MOC werden die Laser- und Ka-Band-Links für die Kundensatelliten geplant. Somit ist das MOC auch die Schnittstelle nach außen zu den LEO SCCs wie z.B. dem ESOC in Darmstadt für die Sentinel-Satelliten. Die Linkplanungen werden dann – je nach gewähltem geostationären Satelliten – nach Oberpfaffenhofen zum DPCC oder eben SCC geleitet, wo die oben genannte Verarbeitung in operationelle Produkte stattfindet.

Bis heute sind die Ergebnisse des Missionsbetriebs sehr zufriedenstellend. Das Hauptziel ist natürlich die Herstellung der Laserverbindungen zwischen den LEO- und GEO-Satelliten. In Tabelle 1 werden hierzu drei wichtige Kenngrößen aufgelistet: Die Anzahl der erfolgreichen Linkverbindungen, die reine Kommunikationszeit, und die übertragene Datenmenge, aufgeteilt auf die beiden Teilprojekte EDRS-A und EDRS-C, und aufsummiert über die gesamte jeweilige Missionsdauer bis zum Sommer 2023. Hierbei werden nur die Datenübertragungen über das LCT und nicht die Ka-Band-Verbindungen berücksichtigt. Am Beginn und Ende jedes Links existieren Zeitintervalle, in denen das LCT die Verbindung vorbereitet (für die räumliche und frequenzielle Erfassung) beziehungsweise zur Parkposition zurückfährt. Diese Zeitintervalle werden bei der Angabe der Kommunikationszeit in Tabelle 1 nicht beachtet, um nur die reine Datenübertragung darzustellen. Zählt man beide Teilprojekte zusammen, so wurde am 25.04.2023 die Kommunikationszeit von 1.000.000 Minuten überschritten [23]. Anfang Juli lag diese Zahl dann bei fast 1.050.000 Minuten, was einer Anzahl von über 72.000 Laser Links und einer übertragenen Datenmenge von 4.220 Terabyte entspricht.

Die Werte dieser Indizes sind nicht gleichmäßig zwischen EDRS-A und EDRS-C verteilt. Einerseits ist dies auf die Tatsache zurückzuführen, dass EDRS-A zu einem früheren Zeitpunkt gestartet wurde und somit länger in Betrieb ist. Andererseits wurde erst vor kurzem eine gleichmäßigere Verteilung der täglichen Anzahl von Laserverbindungen zwischen den beiden GEO-Knotenpunkten eingeführt, mit einer leicht höheren Anzahl auf EDRS-C. Aus diesem Grund nähern sich die Werte beider Teilprojekte inzwischen nach und nach an.

Neben den Laser-Links stellen die Ka-Band-Verbindungen von EDRS-A einen wichtigen Baustein der Mission dar. Dieser Dienst wird nicht von den Sentinel-Satelliten genutzt, die stattdessen auf die schnellere optische Kommunikation zurückgreifen, sondern von den neueren LEO-Kunden PNEO 3+4 sowie dem Columbus-Modul der ISS. Die Anzahl der bisherigen Verbindungen ist damit nicht so hoch wie bei ihrem optischen Pendant. Die Betriebserfahrung zeigt jedoch, dass diese Ka-Band-Verbindungen ebenso zuverlässig arbeiten wie die Laserverbindungen.

Es ist erwähnenswert, dass PNEO 5+6 sowohl den Laser- als auch den Ka-Band-Link-Dienst des SpaceDataHighway genutzt hätte.

Seit Beginn der Mission konnten alle EDRS-Kunden erfolgreich in den Aufbau integriert werden. Während die ersten vier Sentinel-Satelliten bereits kurz nach dem Start des Projektes ein Teil der Mission wurden, fanden die Integrationen von PNEO 3+4 sowie der Ka-Band-Antenne des Columbus-Labors auf der ISS erst später statt. Jede der Phasen der Inbetriebnahme und der Tests im Orbit konnte vom GSOC erfolgreich unterstützt werden.

Darüber hinaus wird das System selbst ständig verbessert. Ein aktuelles Beispiel ist die Automatisierung der Manöver für das Halten der geostationären Position von EDRS-C [20]. Weitere frühere Beispiele von laufenden Verbesserungen des Betriebes sind in [14-17] zu finden.

Der Betrieb von EDRS durch das GSOC wurde nicht nur technisch verbessert, sondern auch in Bezug auf Organisation und Management. Der Start von EDRS-C erfolgte zu einer Zeit, in der EDRS-A bereits in Betrieb war. Da der Launch eines Satelliten immer eine Phase mit hohem Ressourcenverbrauch ist - nicht nur, aber vor allem in Bezug auf das Personal -, waren verschiedene Teams für die beiden oben genannten Aufgaben des DPCC und des SCC zuständig. Mittlerweile sind jedoch beide Satelliten im Routinebetrieb. In dieser Phase erscheint es sinnvoller, das Betriebsteam zu harmonisieren, um zu vermeiden, dass zum Beispiel bekannte Anomalien in einem Teil des Projekts dem anderen Teil unbekannt bleiben. Um die Flexibilität des Projekts aufrechtzuerhalten, wurden somit gemeinsame Aufgaben im Sinne einer kombinierten Projektorganisation zusammengeführt. Dies spiegelt sich zum Beispiel in kombinierten Teams für ähnliche Teilsysteme und der Verwendung vereinheitlichter Tools wieder. Gleichzeitig werden die vorhandenen Unterschiede zwischen DPCC und SCC in den Betriebsabläufen schärfer dargestellt.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der EDRS Mission konnten schon erfolgreich große Datenmengen von LEO Nutzern über die Relaisatelliten zur Erde übermittelt werden. In Zukunft wird sich dieser Nutzerkreis noch erweitern. Mit Sentinel-1c wird EDRS einen weiteren LEO-Kunden erhalten, der die optischen Datenübertragung nutzt. Geplant ist der Start zum Stand der Erstellung dieser Veröffentlichung für Anfang 2024. Es ist davon auszugehen, dass weitere niedrig fliegende Satelliten hinzustoßen werden.

Sowohl die technischen als auch die organisatorischen Aspekte des am GSOC durchgeführten EDRS-Betriebes haben sich bewährt. EDRS-A wie auch EDRS-C befinden sich in einer erfolgreichen Routinephase. Es ist davon auszugehen, dass die Mission noch über einen langen Zeitraum aktiv sein wird. Aufgrund dessen ist es auch im weiteren Verlauf der Mission geplant, die Betriebsabläufe ständig neu zu überdenken, zu erweitern und zu verbessern.

Datenübertragung per Laser bietet speziell im luftleeren Raum hohe Datenübertragungsraten bei hoher Zuverlässigkeit. Diese Eigenschaften sind für den aktuell wachsenden Satellitenmarkt aufgrund der immer höher werdenden Datenmengen sehr wertvoll. Laserkommunikation harmonisiert gut mit der Idee eines Relaisdienstes. Beide Ansätze liegen dem Konzept von EDRS zugrunde. Die Mission und ihre Betriebserfahrungen aus der Sicht des DPCC für EDRS-A und des SCC für EDRS-C, beide unter der Verantwortung des GSOC, wurden in diesem Paper vorgestellt. Der Service hat sich als zuverlässig erwiesen und wird von mehreren LEO-Kunden genutzt. Datenübertragungen über die sekundäre Ka-Band-Verbindung werden erst seit kurzem stärker genutzt, sind aber ebenfalls erfolgreich im Einsatz. Das Bodensystem des GSOC wurde im Laufe der Mission technisch weiter verbessert, um neue Kunden zu unterstützen und neue Funktionen zu implementieren – eine Aufgabe, die in Teilen auch noch fortgeführt wird. Auch die organisatorischen Aspekte der Mission wurden und werden ständig verbessert, was bei Langzeitmissionen wie dem EDRS-Projekt eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt.

- [1] Toyoshima, M., "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications", *Journal of Optical Networking* Vol. 4, Issue 6, pp. 300-311 (2005).
- [2] Rossmannith, G., Kuhlmann, S., Grischechkin, B., Schlepp, B., Pitann, J., "Laser Communication in Space: The TDP-1 Mission Control Center and its current operational experience", *SpaceOps Conference*, Daejeon (2016).
- [3] Benzi, E., Shurmer, I., Pollicella, N., Troendle, D., Lutzer, M., Kuhlmann, S., James, M., "Optical Inter-Satellite Communication: the Alphasat and Sentinel-1A in-orbit experience"; *Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Automated Planning and Scheduling* (2013).
- [4] Hauschildt, H., Admiraal, W., Benzi, E., Born, M., Diaz Martin, M., Evans, D., Garat, F., Greus, H., Kably, K., Lautier, J.-M., Lejault, J.-P., Le Gallou, N., Mezzasoma, S., Moeller, L., Maria Perdigues, J., Rivera Castro, J., Salenc, C., Sarasa, P., Witting, M., Watterton, T., "European Data Relay System - Operational Service Using Optical Communications Technology", *ICSOS* (2015).
- [5] Martin-Pimentel, P., Rochow, C., Gregory, M., Heine, F., Kaempfner, H., Troendle, D., Sterr, U., Kuhlmann, S., Ballweg, R., Lutzer, M., Philipp-May, S., Guetlich, B., Meyer, R., "Laser Com in space, the operational concept", *AIAA SpaceOps Conference*, Pasadena, CA (2014).
- [6] Heine, F., Troendle, D., Rochow, C., Saucke, K., Motzigemba, M., Meyer, R., Lutzer, M., Benzi, E., Hauschildt, H., "Progressing towards an operational optical data relay service", *Proc. SPIE 10096, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX* (2017).
- [7] Knopp, M., Spörl, A., Gnat, M., Rossmannith, G., Huber, F., Fuchs, C., Giggenbach, D., "Towards the Utilization of Optical Ground-to-Space Links for Low Earth Orbiting Spacecraft" *69th International Astronautical Congress (IAC)*, Bremen, Germany (2018).
- [8] Kuhlmann, S., "Operation of TerraSAR LCT and Implications for Future Projects (NFIRE to TSX, TDP1, EDRS)" *SpaceOps Workshop*, Laurel, MD, USA, June (2013).
- [9] Gregory, M., Heine, F., Kaempfner, H., Meyer, R., Fields, R., Lunde, C., "Tesat Laser Communication Terminal Performance Results on 5.6 Gbit coherent Inter Satellite and Satellite to Ground Links", *ICSO International Conference on Space Optics*, (2010).
- [10] Marynowski, T., et. al., "Status of the Laser Communication TDP1 Program and its contribution to Science and Industry", *27th Ka and 39th ICSSC Conference*, Stresa, Italy (2021).
- [11] Wörle, M., Lenzen, C., Wiesner, S., Prüfer, S., Petrak, A., Müller, K., "Replacing the TDP-1 Mission Planning System – more than just another Technical Demonstration Project", *International Astronautical Congress*, Dubai, United Arab Emirates (2021).
- [12] Rossmannith, G., Kuhlmann, S., Beck, T. "The different roles of the DLR German Space Operations Center in recent Laser Communication", *68th International Astronautical Congress (IAC)*, Adelaide, Australia (2017).
- [13] Wallrapp, F., Ballweg, R., Gataullin, Yunir, "The European Data Relay System (EDRS): Operational Challenges", *62nd International Astronautical Congress*, Cape Town, SA (2011).
- [14] Scharringhausen, J.-C., Kolbeck, A., Beck, A., "A Robot on the Operator's Chair – The Fine Line Between Automated Routine Operations and Situational Awareness", *SpaceOps Conference*, Daejeon, Korea (2016).
- [15] Beck, T., Schmidhuber, M., Scharringhausen, J.-C., "Automation of Complex Operational Scenarios Providing 24/7 Inter-Satellite Links with EDRS", *SpaceOps Conference*, Daejeon, Korea (2016).
- [16] Göttfert, T., Grischechkin, B., Wörle, M.-T., Lenzen, C., "The Link Management System for the European Data Relay System", *SpaceOps Conference*, Daejeon, Korea (2016).
- [17] Scharringhausen, J., Seelmann, J., "The evolution of the EDRS control centre for automated operations of EDRS-C", *16th International Conference on Space Operations*, Cape Town, South Africa (2021).
- [18] Rossmannith, G., Faller, R., Bernonville, S., Schmidhuber, M., "EDRS-C – Challenging Way of Bringing the Second Orbital Node into Space", *16th International Conference on Space Operations*, Cape Town, South Africa (2021).
- [19] "Vega C fails on second launch", *Spacenews*, December 20, 2022, <https://spacenews.com/vega-c-fails-on-second-launch/> (accessed mid of January 2023)
- [20] Schwarz, V., Pfeiff, M., Scharringhausen, J., "Flying a satellite by a robot - Automated Station Keeping Maneuvers replace the traditional commanding by human", *17th International Conference on Space Operations*, Dubai, United Arab Emirates (2023).
- [21] Grillmayer L., Arnold, S., "Integrating the Cubesat Space Protocol into GSOC's Multi-Mission Environment", *Small Satellite Conference* (virtual, 2020).
- [22] Rödiger, B., Menninger, C., Fuchs, C., Grillmayer, L., Arnold, S., Rochow, C., Wertz, P., Schmidt, C., "High data-rate optical communication payload for CubeSats", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, SPIE Optical Engineering + Applications, San Diego (2020).
- [23] Pressemitteilung Airbus Defense and Space, 25.04.2023, <https://securecommunications.airbus.com/en/news/edrs-is-reaching-1000000-minutes-of-communications>.