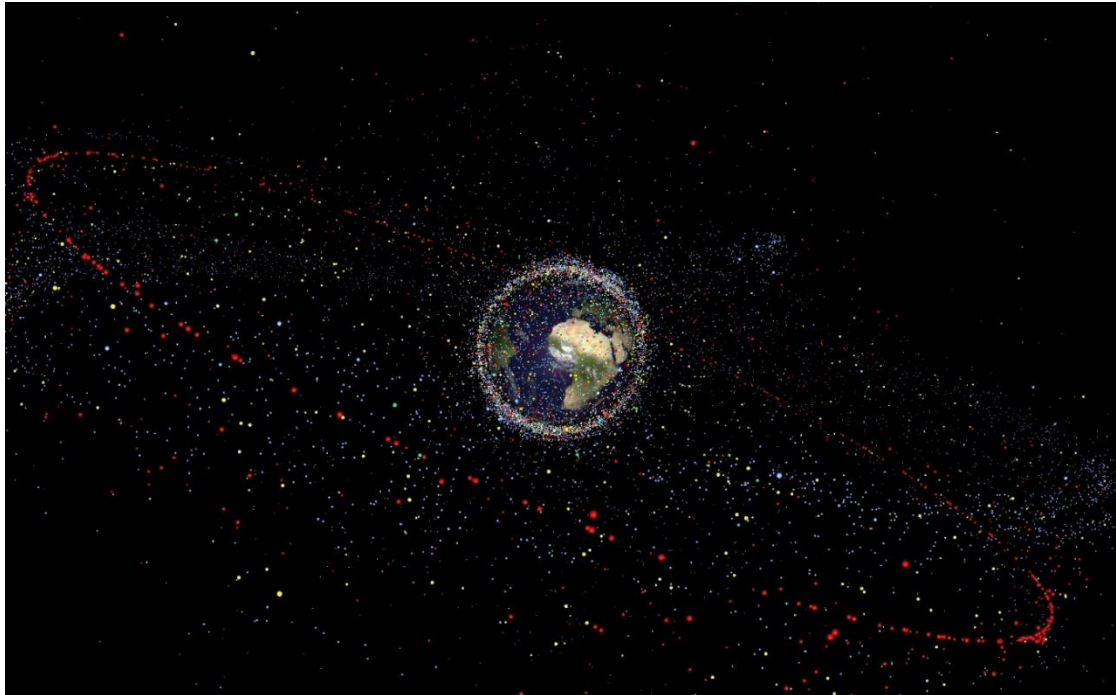


Blechlawine am Himmel

Weltraumschrott - eine naturwissenschaftliche Annäherung



Verteilung von Weltraumschrott um die Erde (Abbildung: FLICKR, 2016)

Aline Usinger, 6bG

Maturitätsarbeit Kantonsschule Rychenberg Winterthur

Betreuung durch Matias Meier Trüllinger

Zweitbeurteilung durch Lukas Morf

4. Dezember 2018

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abstract	IV
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Teil	3
2.1 Definition von Weltraumschrott	3
2.2 Menge, Ort und Grösse von Weltraumschrott	3
2.2.1 Allgemeines	3
2.2.2 Niedrige Erdumlaufbahnen (LEO).....	4
2.2.3 Geostationäre Erdumlaufbahnen (GEO)	5
2.3 Entwicklung der Weltraumschrottpopulation	6
2.3.1 Von Sputnik 1 bis heute.....	6
2.3.2 Zukünftige Entwicklung	7
2.4 Entstehung von Weltraumschrott, damit verbundene Risiken und Folgen.....	8
2.4.1 Ursachen von Weltraumschrott	8
2.4.2 Durch Weltraumschrott verursachte Probleme.....	9
2.4.2.1 Risiken für die Erde im Fall eines unkontrollierten Absturzes.....	9
2.4.2.2 Risiken für die Raumfahrt.....	10
2.5 Mögliche Gegenmassnahmen	10
2.5.1 Massnahmen gegen schon bestehenden Schrott	10
2.5.2 Verhinderung der Bildung weiteren Schrotts.....	12
3 Praktischer Teil	14
3.1 Observatorium Zimmerwald	14
3.1.1 Überblick über den Aufenthalt am Observatorium.....	14
3.1.2 Benutztes Teleskop (Zimlat)	15
3.1.2.1 Aufbau	15
3.1.2.2 Ablauf einer Observation	15
3.1.3 Benutzte Software (Celmech).....	19
3.2 Begriffserklärungen und Definitionen	19
3.2.1 Two Line Elements Format (TLE)	19
3.2.2 Bahnparameter.....	21
3.2.3 Weitere Begriffe	24
3.3 Berechnungsgrundlagen.....	26
3.3.1 Analytische Berechnung der Winkelgeschwindigkeit	26
3.3.2 Analytische Berechnung von Bahnradius und -geschwindigkeit.....	28
3.3.3 Analytische Berechnung der Inklination.....	29
3.3.4 Vergleich mit früheren Daten.....	31
3.3.5 Bahnbestimmung durch die Celmech Software	31
3.4 Beobachtete Objekte.....	31
3.4.1 Amerikanische Raketenstufe (Objekt 68081G)	31
3.4.1.1 Beschreibung des Objekts	31
3.4.1.2 Resultate und Interpretation der Ergebnisse	32
3.4.2 Russische Raketenstufe (Objekt 76092F)	40
3.4.2.1 Beschreibung des Objekts	40

Inhaltsverzeichnis	III
3.4.2.2 Resultate und Interpretation der Ergebnisse	40
3.5 Aufgetretene Probleme	47
4 Zusammenfassung	49
Danksagung	V
Literaturverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
Anhang	XIII
A. Tabellarische Resultate des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G.....	A-1
B. Tabellarische Resultate des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 76092F	B-1
C. Berechnung der Inklination des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G	C-1
D. Berechnung der Inklination des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 76092F.....	D-1

Abstract

Bei Weltraumschrott handelt es sich um von Menschenhand geschaffene Objekte in verschiedenen Erdumlaufbahnen sowie Teile davon, welche keinerlei Zweck (mehr) erfüllen.

Die vorliegende Maturaarbeit widmet sich neben den theoretischen Grundlagen dem Thema Weltraumschrott in einem praktischen Teil anhand konkreter eigener Beobachtungen. Mit Unterstützung des Astronomischen Instituts der Universität Bern war es möglich, am Observatorium Zimmerwald zwei Schrottoobjekte zu beobachten und deren Bahnen zu berechnen.

Ziel der Arbeit ist es, die Problematik von Weltraumschrott darzulegen und aufzuzeigen, warum es wichtig ist, diesen kontinuierlich zu überwachen und wo immer möglich zu vermeiden.

1 Einleitung

Nicht nur auf der Erde sehen wir uns mit dem Problem von zunehmendem Müll und den daraus resultierenden Schäden für die Umwelt konfrontiert, sondern auch im Weltraum, vor allem in erdnahen Umlaufbahnen. Seit dem Start von Sputnik 1, dem ersten künstlichen Satelliten, am 4. Oktober 1957 wurden dort Unmengen von Schrott zurückgelassen, sei es in Form von ausrangierten oder funktionsunfähigen Satelliten, ausgebrannten Raketentufen oder Trümmern aus Explosionen von Raumfahrzeugen oder Kollisionen untereinander. Laut Daten der Europäischen Weltraumagentur ESA befinden sich heute über 750'000 Objekte mit einem Durchmesser grösser als einen Zentimeter auf verschiedenen Umlaufbahnen um die Erde (ESA, 2018, Space Debris). Das sind etwa fünfhundertmal mehr Teilchen, als dass es zurzeit aktive Satelliten gibt.

Das Weltall und die Raumfahrt faszinieren und interessieren mich schon seit langem. Als ich 2010 bei einem Zeichenwettbewerb der Sternwarte Eschenberg den ersten Preis gewann und aus der Hand von Markus Griesser ein Bruchstück des 1891 beim Eintritt in die Erdatmosphäre explodierten Meteoriten „Canyon Diablo“ entgegennehmen durfte, wurde mein Interesse zum ersten Mal „handfest“. Drei Jahre später hat der Kinofilm „Gravity“, in welchem eine Weltraummission durch Trümmerteile eines Satelliten zu scheitern droht, mir die durch Menschenhand geschaffenen Gefahren von Weltraumschrott vor Augen geführt (IMDb MOVIE DATABASE, 2013, Gravity). Davon ausgehend begann ich, das Thema in den Medien zu verfolgen und weiter zu recherchieren. Schon bald merkte ich, dass Weltraumschrott nicht nur in der Fiktion, sondern auch in Realität ein ernst zu nehmendes Problem darstellt.

Das Ziel meiner Arbeit ist es, einen Überblick über das Thema Weltraumschrott zu geben und die damit verbundene Problematik aufzuzeigen. Ausserdem will ich darlegen, warum es so wichtig ist, die Umlaufbahnen von Weltraumschrott-Objekten kontinuierlich zu verfolgen. Zu diesem Zweck habe ich mir vorgenommen, selbst solche Objekte zu beobachten und herauszufinden, welche Möglichkeiten es gibt, mit den mir zur Verfügung stehenden Methoden die Bahnen der beobachteten Objekte zu bestimmen.

Meine Arbeit besteht aus zwei Teilen: Im ersten, theoretischen Teil versuche ich, das Thema Weltraumschrott allgemein darzustellen. Dies beinhaltet die Definition von Weltraumschrott, die potentielle Bedrohung, die davon ausgeht, die Entwicklung der Schrottpopulation im Lauf der Zeit, sowie Gegenmassnahmen, um bestehende und zukünftige Gefahren zu minimieren. Den Kern des zweiten, praktischen Teils meiner Arbeit bilden die Beobachtungsergebnisse von zwei verschiedenen Weltraumschrott-Objekten, einer amerikanischen und einer russischen Raketentstufe, die ich während der Sommerferien 2018 mit Unterstützung des Astronomischen Instituts der Universität Bern gesammelt

habe. Basierend auf diesen Messdaten habe ich eigene Berechnungen angestellt, um die Bahnparameter der beiden Objekte zu ermitteln und mit bekannten Daten zu vergleichen. Anschliessend werden die aufgetretenen Probleme thematisiert. Die Arbeit endet mit einem zusammenfassenden Schlusswort, gefolgt von der Danksagung, dem Literatur-, Abbildungs- und Abkürzungsverzeichnis sowie dem Anhang.

2 Theoretischer Teil

2.1 Definition von Weltraumschrott

Grundsätzlich gibt es für Weltraumschrott keine einheitliche, international anerkannte Definition. Das „Inter-Agency Space Debris Coordination Committee“, abgekürzt IADC, welches ein Forum von momentan 13 nationalen Weltraumorganisationen darstellt, definiert den Begriff Weltraumschrott wie folgt (sinngemäss aus dem Englischen übersetzt):

„Weltraumschrott sind alle von Menschen hergestellten Objekte, inklusive Elemente und Fragmente davon, welche keinen Zweck (mehr) erfüllen und sich in einer Erdumlaufbahn befinden oder in die Atmosphäre wiedereintreten.“ (SCHILDKNECHT, 2015, S. 115)

Bei den heute immer noch überwiegend eingesetzten, nur einmal verwendbaren Trägerraketen besteht lediglich ein kleiner Teil der Gesamtmasse aus der eigentlichen Nutzlast, zum Beispiel einem Satelliten. Der bei weitem grösste Teil der Trägerrakete hat innerhalb von wenigen Minuten ausgedient und wird damit zu Schrott. Auch die Nutzlast wird schliesslich eines Tages zu Weltraumschrott, nachdem sie ausrangiert worden ist. Gemäss obiger Definition sind neben funktionsunfähigen Satelliten und ausgedienten Teilen von Trägerraketen auch von Astronauten verlorenes Werkzeug sowie ausgelaufener Treibstoff Weltraumschrott. Der weitaus grösste Teil des sich in verschiedenen Umlaufbahnen um die Erde befindenden Schrotts besteht jedoch aus Trümmerteilen, die das Produkt von Kollisionen oder Explosionen von Raumfahrzeugen sind.

Zum Ganzen: SCHILDKNECHT, 2015, S. 115; DLR, 2018, Weltraummüll-Forschung; WIKIPEDIA, 2018, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee.

2.2 Menge, Ort und Grösse von Weltraumschrott

2.2.1 Allgemeines

Man weiss bis heute nicht genau, wieviel Weltraumschrott sich tatsächlich im All befindet. Die mittlerweile über 5'250 Raketenstarts und mehr als 300 Kollisionen bzw. Explosionen von Raumfahrzeugen, die im öffentlich zugänglichen Teil des vom US Space Surveillance Network (SSN) geführten Katalogs enthalten sind, haben zu knapp 18'000 Objekten im Weltraum geführt (IAA REPORT, 2016, S. 13). Zusätzlich werden ungefähr 6'000 weitere Objekte, die entweder geheim sind oder nicht einem bestimmten Raketenstart zugeordnet werden können, systematisch verfolgt. Insgesamt entsprechen die vom SSN katalogisierten Objekte im Erdorbit einer Masse von etwa 7'500 Tonnen. Zudem muss mit mehreren 10 Tonnen an Fragmenten, also Bruchstücken, in Subkataloggrösse gerechnet werden. Von

Subkataloggrösse spricht man bei Objekten, welche mit den heutigen technischen Mitteln wegen ihrer geringen Grösse nicht systematisch verfolgt werden können (IAA REPORT, 2016, S. 13).

Nur 6 oder 7 Prozent der vom SSN katalogisierten Objekte sind funktionstüchtige Satelliten, während 28 Prozent nicht (mehr) funktionieren, zum Beispiel wegen Treibstoffmangel, wohl aber noch intakt sind. 64 Prozent stellen Fragmente dar, welche zum grössten Teil von Explosionen, aber auch von Kollisionen stammen (IAA REPORT, 2016, S. 13). 75 Prozent dieser Trümmerteile befinden sich in einer niedrigen Umlaufbahn um die Erde (LEO, siehe Kapitel 2.2.2) und lediglich 7 Prozent in einer geostationären oder beinahe geostationären Umlaufbahn (GEO, siehe Kapitel 2.2.3).

2.2.2 Niedrige Erdumlaufbahnen (LEO)

Die Mehrheit der Schrottteile befindet sich auf niedrigen Umlaufbahnen um die Erde, im sogenannten Low Earth Orbit (LEO). Dabei handelt es sich um Bahnen in einer Höhe zwischen 200 und 2'000 Kilometern über der Erdoberfläche (SCHILDKNECHT, 2015, S. 116; WIKIPEDIA, 2018, Satellitenorbit). Es kann angenommen werden, dass im LEO die Umlaufbahnen aller Objekte, die eine Grösse von mehr als zehn Zentimetern aufweisen, bekannt sind. Für kleinere Objekte existieren aufgrund der fehlenden technischen Möglichkeiten der Vermessung nur beschränkte statistische Informationen (SCHILDKNECHT, 2015, S. 116).

Die nachfolgende Abbildung 1 verdeutlicht, dass sich die grösste Population an erdnahen Objekten in einer Höhe zwischen circa 600 und 1'000 Kilometern befindet, mit einem Maximum bei ungefähr 800 Kilometern. Diese Zone wird von Fragmenten dominiert, die sich entweder in einer LEO Umlaufbahn befinden oder diese kreuzen. Zwei Ereignisse haben zu dem Maximum in der Höhe von 800 Kilometern signifikant beigetragen: Zum einen der Chinesische Anti-Satelliten Test am 11. Januar 2007, ein militärischer Raketentest an dem ausgedienten Wettersatelliten Feng Yun 1C in einer Höhe von 860 Kilometern. Dieses Experiment hatte 3'433 katalogisierte Objekte, über 40'000 Trümmerteile grösser als einen Zentimeter und vermutlich viele Millionen noch kleinere Bruchstücke zur Folge. Zum anderen die unbeabsichtigte Kollision zwischen den Amerikanischen Kommunikationssatelliten Iridium 33 und Cosmos 2251 am 10. Februar 2009 in einer Höhe von 789 Kilometern. Aus diesem Zusammenstoss ergaben sich 2'296 neue katalogisierte Schrottteile (WIKIPEDIA, 2018, Fengyun-1C; WIKIPEDIA, 2018, Satellitenkollision am 10. Februar 2009; WIKIPEDIA, 2018, 2009 satellite collision; IAA REPORT, 2016, S. 103). Die kleinere Spitze bei einer Höhe von 1'500 Kilometern rührt vor allem von drei unbeabsichtigten Explosionen der Zweitstufen von Delta-Raketen um 1970 her (IAA REPORT, 2016, S. 103).

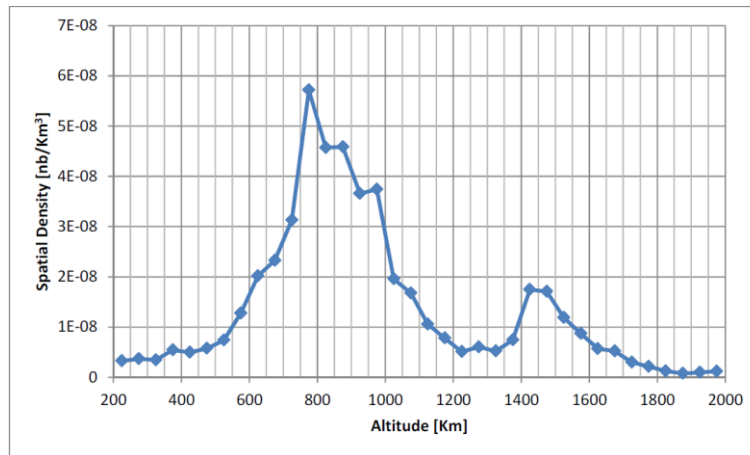


Abbildung 1: Räumliche Dichte von 10 cm und grösseren Objekten als Funktion der Höhe (Altitude) im LEO am 1. Mai 2009. (nb bedeutet Anzahl; 7E-08 bedeutet $7 \cdot 10^{-8}$). (Abbildung: IAA REPORT, 2016).

2.2.3 Geostationäre Erdumlaufbahnen (GEO)

In einer Höhe von etwa 35'786 Kilometern über dem Äquator befindet sich der Geostationary Earth Orbit (GEO), die sogenannte geostationäre Umlaufbahn (WIKIPEDIA, 2018, Satellitenorbit; SCHILDKNECHT, 2015, S. 116; IAA REPORT, 2016, S. 13). Geostationäre Satelliten, wie zum Beispiel Telekommunikations-satelliten oder Wettersatelliten, scheinen von der Erde aus gesehen unbeweglich am Himmel zu stehen, da ihre Winkelgeschwindigkeit gleich der des Beobachters auf der Erde ist (SCHILDKNECHT, 2015, S. 116). Somit entspricht die Umlaufzeit eines solchen Satelliten genau der Rotationsdauer der Erde, respektive 24 Stunden (Spektrum, geostationärer Satellit). Mit zunehmender Höhe werden Informationen über Weltraumschrott-Teile und deren Umlaufbahnen immer spärlicher. So sind im geostationären Orbit nur genauere Informationen zu Objekten verfügbar, die grösser als einen Meter sind. In den letzten Jahren wurden zwar beachtliche Fortschritte in der Katalogisierung von Objekten mit einer Grösse zwischen 0,1 und 1 Meter gemacht, jedoch existieren weiterhin keine gesicherten Informationen über noch kleinere Objekte (SCHILDKNECHT, 2015, S. 116).

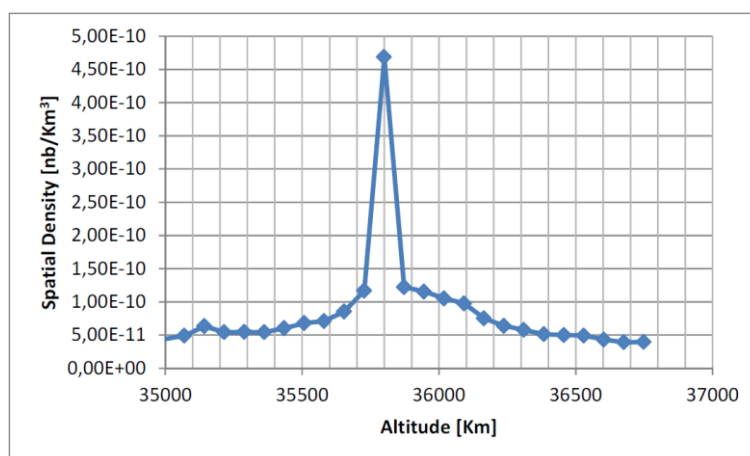


Abbildung 2: Räumliche Dichte von 10 cm und grösseren Objekten als Funktion der Höhe (Altitude) im GEO am 1. Mai 2009. (nb bedeutet Anzahl; 5,00E-10 bedeutet $5,00 \cdot 10^{-10}$). (Abbildung: IAA Report, 2016).

Abbildung 2 zeigt, dass das Maximum der Objekte im GEO bei 35'800 Kilometern liegt. Dies kommt vor allem durch die Vielzahl an aktiven geostationären Satelliten zustande, aber auch durch solche, die mittlerweile ausser Betrieb sind, während die meisten tiefer oder höher fliegenden Objekte Weltraumschrott darstellen (IAA REPORT, 2016, S. 103).

Zwischenfazit:

Weltraumschrott ist nicht gleichmässig in den verschiedenen Erdumlaufbahnen verteilt und deshalb sind je nach Orbit Raumfahrzeuge wie Satelliten und Raketen unterschiedlich stark gefährdet.

2.3 Entwicklung der Weltraumschrottpopulation

Wie hat sich die Menge des Weltraumschrotts von 1957 bis in die heutige Zeit entwickelt? Und wie wird sie zukünftig aussehen? Diesen Fragen gilt es in den folgenden Kapiteln nachzugehen.

2.3.1 Von Sputnik 1 bis heute

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist die Menge von Objekten im Weltall seit dem Start von Sputnik 1, dem ersten künstlichen Erdsatelliten, im Oktober 1957 stets angestiegen (IAA REPORT, 2016, S. 103).

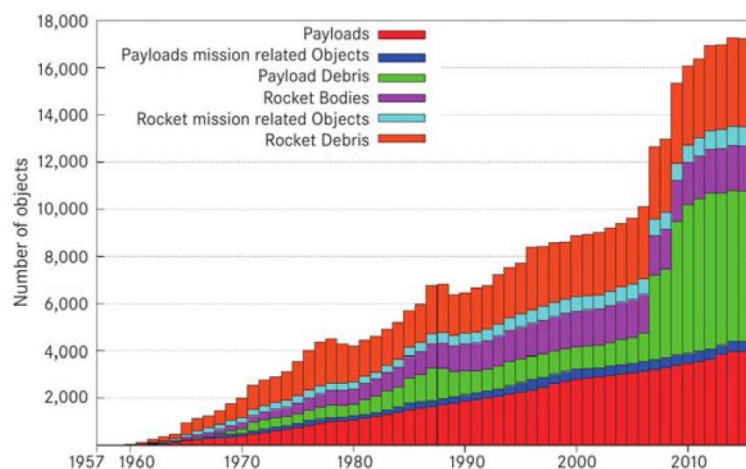


Abbildung 3: Zunahme der Anzahl der Objekte mit einer Grösse von 10 cm und mehr zwischen 1957 und 2015. (Abbildung: SCHILDKNECHT, 2015).

- „Payloads“ sind die zu transportierenden Nutzlasten und „Rocket Bodies“ die Trägerraketen.
- „Mission related Objects“ sind Schrottteilchen welche im Verlauf einer Mission anfallen, zum Beispiel durch für den Start montierte Schutzabdeckungen, die vor der Nutzung des Satellits entfernt werden müssen (siehe Kapitel 2.4.1).
- „Debris“ ist Schrott, der beispielsweise durch Kollisionen oder Explosionen von Raketen oder deren Nutzlasten entstanden ist.

Vor allem in erdnahen Orbits (LEO) hat sich die Anzahl der Objekte in den vergangenen Jahren markant vergrössert. Dies ist nicht nur darauf zurückzuführen, dass sich in diesen Orbits die meisten von Menschenhand gefertigten Objekte befinden und dass diese Objekte verglichen mit anderen Orbits die

höchsten Bahngeschwindigkeiten besitzen, womit die Wahrscheinlichkeit einer Kollision über einen gewissen Zeitraum am grössten ist (siehe u.a. IAA REPORT, 2016, S. 105), sondern auch auf die zwei Kollisionen in den Jahren 2007 und 2009 (siehe Kapitel 2.2.2).

2.3.2 Zukünftige Entwicklung

Zurzeit geht man davon aus, dass in Zukunft die Weltraumschrott-Population im geostationären Orbit (GEO) mit einer konstanten Rate zunehmen wird. Im Gegensatz dazu haben kürzlich durchgeführte Studien ergeben, dass die Menge an Schrottteilen in erdnahen Orbits (LEO) in den nächsten Jahren immer stärker steigen wird.

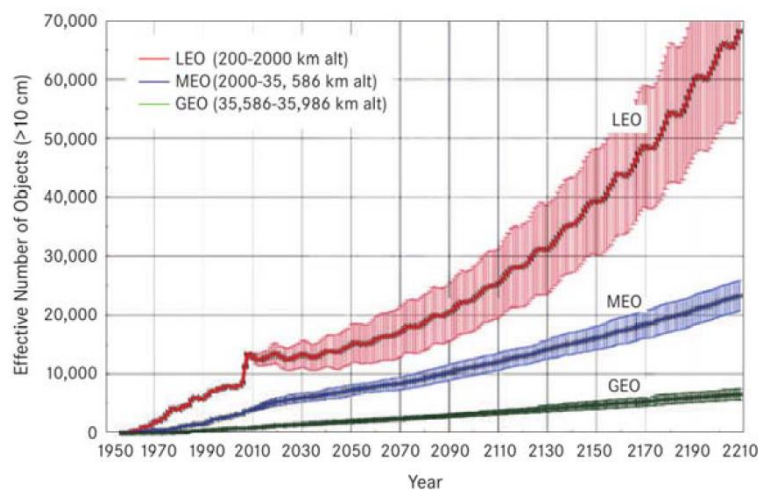


Abbildung 4: Prognostizierte Zunahme der Anzahl der Objekte mit einer Grösse von 10 cm und mehr in den nächsten 200 Jahren, basierend auf einem Modell der NASA. MEO entspricht dabei dem „Medium Earth Orbit“, d.h. Umlaufbahnen zwischen LEO und GEO. (Abbildung: SCHILDKNECHT, 2015).

Es besteht sogar die Möglichkeit, dass wegen der zunehmenden Dichte der Schrottteile bei einer Kollision neu entstandene Fragmente sofort wieder mit anderen kollidieren. Diese Objekte stossen dann wiederum mit anderen zusammen. So entstehen immer mehr, immer kleinere Fragmente, die wiederum grosse, eventuell noch funktionstüchtige Objekte bei einem Zusammenprall zerstören können. Da diese kleinen Teilchen wegen ihrer Grösse nicht zu erfassen sind, kann nichts unternommen werden, um eine Kollision zu vermeiden. Die Folge davon wäre ein exponentieller Anstieg der Schrottpopulation. Dieses Szenario wurde 1978 von Donald J. Kessler vorausgesagt und wird daher Kessler Syndrom genannt. Damit würde für lange Zeit jede Art von Raumfahrt verunmöglicht (siehe u.a. SCHILDKNECHT, 2015, S. 128 f.).

Besagtes Modell und die damit erstellten Vorhersagen hängen jedoch von vielen, noch nicht bekannten Variablen ab, weswegen eine Vielzahl von möglichen Zukunftsszenarien eintreten kann. Einige dieser Variablen sind zum Beispiel die zukünftige Entwicklung der Raumfahrttechnik, insbesondere von wiederverwendbaren Trägerraketen, die Anzahl und Grösse der Raketen, die jedes Jahr gestartet werden, die Menge an katastrophalen Kollisionen, bei denen die beteiligten Objekte komplett zerstört

werden und der Erfolg zukünftiger Projekte zur Entfernung von Weltraumschrott (IAA Report, 2016, S. 111 und SCHILDKNECHT, 2015, S.128).

Zwischenfazit:

Bei konstant steigender Frequenz von Raketenstarts und dem gegenwärtig zu beobachtenden Trend zu kleinen, dafür aber in grosser Zahl in den Orbit gebrachten Satelliten steigt die Wahrscheinlichkeit, dass auf viel gebrauchten Orbits, wie dem LEO, irgendwann das Kessler Syndrom eintritt.

2.4 Entstehung von Weltraumschrott, damit verbundene Risiken und Folgen

Nun sollen die Ursachen aufgezeigt werden, wie Weltraumschrott entsteht und welche Risiken für die Erde und die Raumfahrt von diesen Objekten ausgehen.

2.4.1 Ursachen von Weltraumschrott

Wie bereits in Kapitel 2.1 kurz erwähnt, kann Weltraumschrott viele Ursachen haben (siehe dazu SCHILDKNECHT, 2007, S. 47 ff.; WIKIPEDIA, 2018, Weltraummüll; WIKIPEDIA, 2018, Space debris):

- **Ausrangierte Satelliten**

Satelliten haben eine begrenzte Lebensdauer. Ist ihre Zeit abgelaufen, sei es, weil ihre Elektronik nicht mehr funktioniert, sie keinen Treibstoff mehr haben, um die gewünschte Bahn zu halten, oder weil sie einfach zu alt sind, bleiben sie oftmals in ihrem Orbit und sind somit neuen Satelliten oder auch Raketen im Weg.

- **Missionsbedingte Objekte**

Bis ein Satellit oder eine Rakete ihr Ziel erreicht haben, fallen sogenannte MRO (Mission-Related Objects) an. Dazu gehören abgetrennte Raketenstufen, die wegen der schon gewonnenen Höhe nicht sofort in der Atmosphäre verglühen, oder auch Abdeckungen von Teleskopen, die diese vor Verunreinigungen während des Starts schützen, vor dem ersten Gebrauch jedoch entfernt werden müssen.

- **Erosion**

Durch Umwelteinflüsse wie kosmische Strahlung, aber auch durch Einschläge von Meteoriten und Mikrometeoriten (WIKIPEDIA, 2018, Space weathering) werden Objekte, die sich über einen längeren Zeitraum im Weltall befinden, in Mitleidenschaft gezogen, wobei sich Teile der Objekte, wie zum Beispiel Thermalschutzfolien, lösen können.

- **Explosionen**

Explosionen von Satelliten und Raketenstufen werden nicht nur durch absichtliche Sprengungen, wie beim Anti-Satelliten Test 2007 (siehe Kapitel 2.2.2) hervorgerufen, sondern beispielsweise auch durch die unbeabsichtigte Entzündung von Resttreibstoff oder Batterien.

- **Kollisionen**

Kollisionen, sei es zwischen noch funktionstüchtigen oder funktionsunfähigen Objekten, Teilen davon oder mit Meteoriten, stellen bei Weitem die häufigste Ursache von Weltraumschrott dar. Dabei können die betroffenen Objekte beschädigt oder aber auch in einer katastrophalen Kollision komplett zerstört werden. Im Durchschnitt ereignet sich eine katastrophale Kollision alle drei bis zehn Jahre (SCHILDKNECHT, 2015, S.128 f.).

- **Verlorengegangenes Equipment**

Immer wieder verlieren Astronauten auf ihren Ausseneinsätzen Gegenstände, wie zum Beispiel Werkzeuge oder Kameras. Selbst diese kleinen Unaufmerksamkeiten können im Fall einer Kollision mit einem Raumfahrzeug gravierende Folgen haben.

2.4.2 Durch Weltraumschrott verursachte Probleme

Weltraumschrott birgt nicht nur Gefahren für Raumfahrzeuge und sich eventuell darin befindliche Personen, sondern auch für die Erde.

2.4.2.1 Risiken für die Erde im Fall eines unkontrollierten Absturzes

Laut der amerikanischen Weltraumbehörde NASA fiel während der letzten 50 Jahre durchschnittlich ein katalogisiertes Weltraumschrott-Teil pro Tag zurück auf die Erde. Zudem traten auch viele nicht katalogisierte, kleinere Objekte in die Atmosphäre ein. Jedoch verbrannten die meisten Objekte durch die Reibung mit der Atmosphäre, bevor sie auf den Boden aufgeschlagen konnten. Es wurden nur wenige Ausnahmen dokumentiert, bei denen Weltraumschrott wirklich den Erdboden erreicht hat. Einige dieser Fälle kamen durch einen sogenannten unkontrollierten Absturz zustande (zum Begriff „kontrollierter Absturz“ siehe Kapitel 2.5.1). Bei diesen wurde kein Manöver durchgeführt, um den Eintrittswinkel in die Atmosphäre und damit den Absturzort zu kontrollieren. Grund dafür kann ein Mangel an Treibstoff für das Manöver oder ein Kontrollverlust über das Objekt gewesen sein. Bei einem ungünstigen Eintrittswinkel ist es praktisch unmöglich, genaue Angaben zu Absturzort und -zeit zu machen. Zudem erschwert auch eine unkontrollierte Rotation des Objektes die Vorhersage, da sich in diesem Fall ständig die Fläche ändert, die dem beim Wiedereintritt immer grösser werdenden Luftwiderstand der Atmosphäre ausgesetzt ist (SCHILDKNECHT, 2007, S. 52 f.; SCHILDKNECHT, 2015, S. 118; IAA REPORT, 2016, S. 85 und S. 88; WIKIPEDIA, 2018, Space_debris#Threats).

Beispiel für einen kürzlich geschehenen unkontrollierten Absturz ist die chinesische Raumstation Tiangong 1 (Chinesisch für „Himmelspalast“) die sich seit September 2011 im Weltraum befand. Im März 2016 brach der Funkkontakt ab, was einen kontrollierten Wiedereintritt verhinderte. Bis wenige Stunden vor dem Absturz konnten weder Zeit noch Ort des Einschlags auf der Erde genau bestimmt werden. Der „Himmelspalast“ stürzte schliesslich am 2. April 2018 in den Südpazifik, nachdem er in mehrere Teile zerbrochen war, von denen einige auch verglühten (FAZ, 2018, Tiangong 1 stürzt über Südpazifik ab; WIKIPEDIA, 2018, Tiangong_1).

Obwohl es Berichte von Menschen gibt, die durch Weltraumschrott verletzt, oder von Sachschäden, die durch herabfallende Objekte verursacht wurden, ist die Wahrscheinlichkeit, getroffen zu werden, extrem klein, nämlich $1/1'000'000'000'000$ – zum Vergleich: die Wahrscheinlichkeit von einem Blitz getroffen zu werden, beträgt $1/1'500'000$ (SCHILDKNECHT, 2015, S. 119).

2.4.2.2 Risiken für die Raumfahrt

Aufgrund der enorm hohen Geschwindigkeiten ist es möglich, dass schon Teilchen im Millimeterbereich, die von der Erde aus nicht einmal beobachtet werden können, einen Satelliten teilweise oder vollständig lahmlegen, beziehungsweise dessen Bahn verändern. Teilchen von einem Zentimeter Durchmesser setzen bei Geschwindigkeiten von 16 km/s, was der maximalen Relativgeschwindigkeit bei einer Frontalkollision in einem erdnahen Orbit entspricht, bei einem Zusammenstoss so viel Energie wie bei der Explosion einer Handgranate frei (IAA REPORT, 2016, S. 69 f.; SCHILDKNECHT, 2007, S. 53 ff.; SCHILDKNECHT, 2015, S. 119).

Zwischenfazit:

Obwohl das Risiko für Menschen, von Weltraumschrott getroffen zu werden, extrem gering ist, überleben immer wieder Objekte den Wiedereintritt in die Atmosphäre und verschmutzen die Erde. Zudem können schon sehr kleine Schrottfragmente Raumfahrzeuge im schlimmsten Fall komplett zerstören.

2.5 Mögliche Gegenmassnahmen

Es stellt sich nun die Frage, was man gegen bestehenden Weltraumschrott tun kann und wie sich die Bildung neuer Teilchen verhindern lässt.

2.5.1 Massnahmen gegen schon bestehenden Schrott

Es gibt verschiedene Ansätze, bestehenden Schrott zu reduzieren. Jedoch bedeuten diese einen erheblichen zusätzlichen Kostenaufwand, weil beispielsweise mehr Treibstoff geladen werden muss

oder Satelliten weniger lang in Betrieb gehalten werden können, da ein Teil des Treibstoffs noch zur „Entsorgung“ benötigt wird (SCHILDKNECHT, 2015, S. 133 f.).

Bei einem kontrollierten Absturz wird der Eintrittswinkel in die Atmosphäre möglichst optimal gewählt, sodass Absturzort und -zeit zuverlässig berechnet werden können. Jedoch sind kontrollierte Abstürze nur bei grossen Objekten sinnvoll, bei denen die Gefahr besteht, dass gewisse Teile nicht komplett verglühen. Zudem beschränken sich die Möglichkeiten für einen kontrollierten Absturz auf Objekte in erdnahen Orbits oder solche die die LEO Region beispielsweise in einer Ellipse durchfliegen (IAA REPORT, 2016, S. 85).

Geostationäre Satelliten oder Raketenstufen, welche Satelliten in einen geostationäre Orbit bringen, werden üblicherweise in einen sogenannten Friedhofsorbit gebracht, wenn sie nicht mehr gebraucht werden, weit genug weg vom GEO, sodass diese noch funktionstüchtigen GEO Satelliten nicht mehr in die Quere kommen können (IAA REPORT, 2016, S. 119).

Die IADC hat folgende Richtlinien aufgestellt, um die Menge an Weltraumschrott zu reduzieren und die verschiedenen Orbits zu entlasten (IAA REPORT, 2016, S. 119 f.):

- Alle nicht mehr funktionsfähigen Objekte in erdnahen Orbits sollen innerhalb von 25 Jahren entweder durch atmosphärischen Widerstand von selbst oder mithilfe ihrer Triebwerke in die Erdatmosphäre eintreten, um dort zu verglühen (Post Mission Disposal Rule, kurz PMD).
- Alle geostationären Objekte sollen in einen Friedhofsorbit bewegt werden, bis eine bessere Lösung für deren Entsorgung gefunden wird.

Abbildung 5 zeigt, dass selbst wenn 90% der LEO Missionen erfolgreich Schrottentsorgungsmaßnahmen wie die 25 Jahre PMD Regel der IADC anwenden, die Schrottpopulation nicht stabilisiert werden kann.

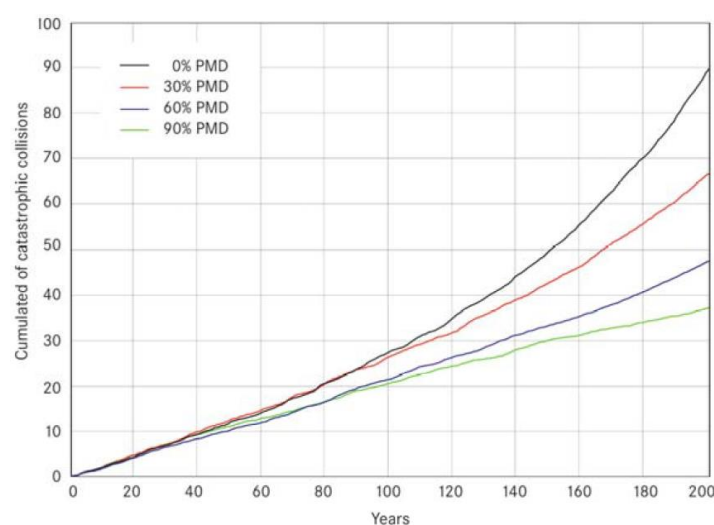


Abbildung 5: Kumulierte Anzahl von katastrophalen Kollisionen im LEO während der nächsten 200 Jahre für 4 Szenarien: 0, 30, 60 und 90% Einhaltung der 25 Jahre PMD (Post Mission Disposal) Regel. (Abbildung: SCHILDKNECHT, 2015).

Daher muss über das aktive Entfernen von massiven Weltraumschrott-Objekten nachgedacht werden. Jedoch müssten selbst bei einer Effizienz von 90% (siehe Abbildung 5) bis zu fünf Objekte pro Jahr entfernt werden, um die Population zu stabilisieren (SCHILDKNECHT, 2015, S. 130).

Es wurden mehrere Ideen entwickelt, um solche Objekte aus dem Weltall zu entfernen: Ein Beispiel ist ESA's e.deorbit Projekt (siehe Abbildung 6), eine Mission zur Technologieerprobung im Rahmen der ESA Clean Space Initiative, wo solche Objekte mithilfe eines Raumfahrzeugs, das mit einem Roboterarm und einem Netz ausgestattet ist, eingefangen und kontrolliert zum Absturz gebracht werden sollen (ESA, 2016, Clean Space).

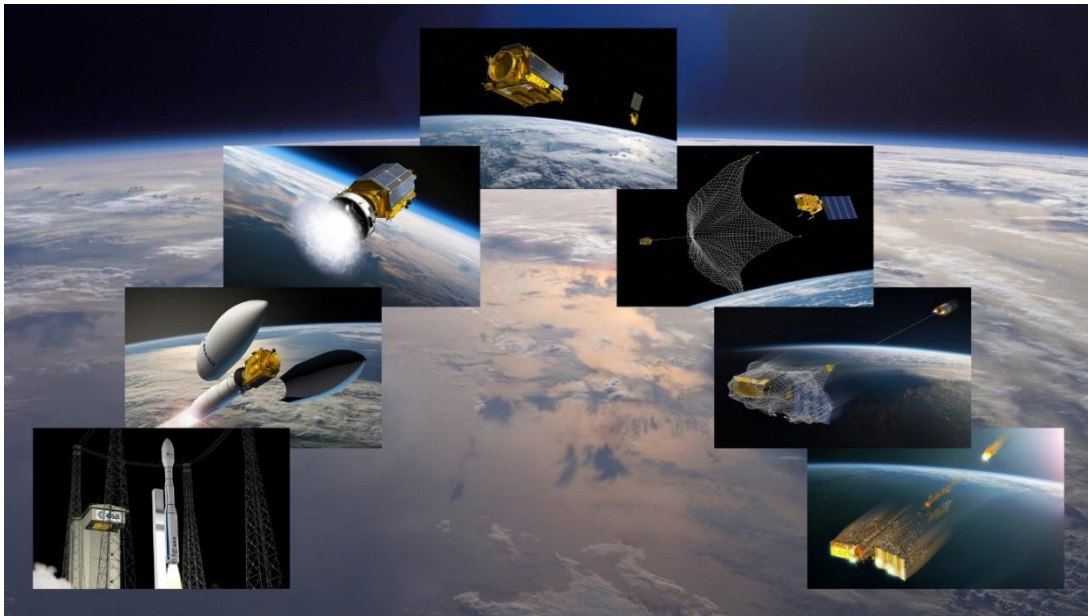


Abbildung 6: ESA's e.Deorbit Mission zur Erprobung von Möglichkeiten der aktiven Entfernung von Weltraumschrott aus niedrigen Erdumlaufbahnen. (Abbildung: FLICKR, 2016).

2.5.2 Verhinderung der Bildung weiteren Schrotts

Anstatt Weltraumschrott mühsam wieder zu entfernen, macht es mehr Sinn, dessen Entstehung zu verhindern. Dies lässt sich bewerkstelligen, indem Raumfahrzeuge, Satelliten, Raketenstufen etc. so konstruiert und gebaut werden, dass sie keine missionsbedingten Objekte, wie zum Beispiel Raketenstufen, in einer Erdumlaufbahn zurücklassen. Falls dies nicht möglich ist, sollte darauf geachtet werden, dass diese Objekte in Anzahl, Region (Orbit) und Lebensdauer minimiert werden (IAA REPORT, 2016, S. 118).

Das Abschirmen von Infrastrukturen im Weltall mithilfe von Schutzschilden ist nur gegen Schrottteilchen möglich, die nicht grösser als einen Zentimeter sind, und mit einem hohen Aufwand verbunden (SCHILDKNECHT, 2015, S. 120). Befinden sich zwei Objekte auf einem Kollisionskurs und ist mindestens eines dieser Objekte aktiv, kann normalerweise ein Ausweichmanöver geflogen werden. Jedoch gibt es keine Garantie, dass das ausgeführte Manöver eine Kollision tatsächlich verhindern kann. Nur die

Wahrscheinlichkeit einer Kollision lässt sich damit senken. Zudem muss eine potentielle Kollision genug früh erkannt werden, da es mehrere Tage dauert (meistens drei), um genauere Daten über die Objekte zu sammeln und zu entscheiden, ob wirklich ein Manöver durchgeführt werden soll. Ausserdem ändert ein solches Manöver die Flugbahn des Objekts, wodurch eventuell dessen Funktion für eine gewisse Zeit eingestellt werden muss, was beispielsweise für Erdbeobachtungssatelliten eine nicht zu verkennende Einschränkung darstellen kann. So ist es nötig, ein weiteres Korrekturmanöver zu veranlassen, um die Mission fortsetzen zu können, was zusätzlich Treibstoff verbraucht und so die Lebensdauer des Objektes weiter verkürzt (IAA REPORT, 2016, S. 62 f.).

Teile der Internationalen Raumstation (ISS) sind mit Schutzschilden versehen worden, die diese vor Teilchen von mehreren Millimetern bis zu einer Grösse von einem Zentimeter schützen können. Grössere, bekannte Objekte werden ständig verfolgt. Ist die Wahrscheinlichkeit einer Kollision höher als ein festgelegter Wert, wird - wenn die Warnung früh genug erfolgt - entweder ein Ausweichmanöver gestartet, oder die Crew in die Soyuz Kapseln evakuiert. Bis Ende 2014 musste die ISS schon 21 Ausweichmanöver fliegen (IAA REPORT, 2016, S. 70; SCHILDKNECHT, 2015, S. 121 f.).

Zwischenfazit:

Es gibt viele Ursachen, wie Weltraumschrott entstehen kann, jedoch existieren bis heute nur beschränkte Lösungsansätze und Ideen, wie man den sich ständig vermehrenden Schrott wieder entfernen oder dessen Bildung ganz verhindern kann.

3 Praktischer Teil

Der Theorieteil hat gezeigt, dass Weltraumschrott zunehmend ein Problem darstellt. Deshalb soll im praktischen Teil der Arbeit herausgefunden werden, wie man Weltraumschrott beobachten und katalogisieren kann, damit irgendwann möglichst alle Objekte bekannt sind und so zukünftige Kollisionen vermieden werden können.

3.1 Observatorium Zimmerwald

Zu Beginn der Arbeit stand die Frage im Raum, ob es wohl möglich wäre, für die Observation von Weltraumschrott das 8-Zoll Spiegelteleskop der Kantonsschule Rychenberg zu benutzen. Nach einem Gespräch mit Markus Griesser von der Sternwarte Eschenberg in Winterthur wurde klar, dass dieses Instrument zur Beobachtung von Weltraumschrott vermutlich nicht geeignet ist. Zum einen, weil bei allen Beobachtungen mit Hilfe von Referenzsternen manuell die genaue Position des Schrottteilchens zu bestimmen gewesen wäre. Zum anderen, weil ich nicht sicher war, ob aufgrund der manuellen Einstellung von Rektaszension und Deklination, welche am Himmel der geographischen Länge und Breite auf der Erde entsprechen (Begriffe siehe Kapitel 3.2.3), eine hinreichende Genauigkeit hätte erreicht werden können, um überhaupt Schrottteile zu finden. Markus Griesser riet mir daher, mich an die Universität Bern respektive das Astronomische Institut (AIUB) unter Leitung von Professor Schildknecht zu wenden, da dieses unter anderem auf die Beobachtung von Weltraumschrott mittels optischer Teleskope und Lasermessungen spezialisiert ist.

Nach der Kontaktaufnahme mit dem AIUB erhielt ich im Sommer 2018 tatsächlich die grossartige Möglichkeit, vom 14. bis zum 16. August unter Anleitung und mit Unterstützung verschiedener Mitglieder des Teams von Professor Schildknecht selbst Beobachtungen am zur Universität gehörenden Observatorium Zimmerwald durchzuführen und die gesammelten Daten auszuwerten.

3.1.1 Überblick über den Aufenthalt am Observatorium

Ausser in der ersten Nacht, in der ich wegen teils bedecktem Himmel erst später beginnen konnte, habe ich von 22 Uhr bis Mitternacht je drei Serien von Beobachtungen durchgeführt. Konzentriert habe ich mich dabei vor allem auf die zwei geostationären Objekte mit den COSPAR-Identifikationsnummern 68081G und 76092F (Begriff siehe Kapitel 3.2.3). Dabei handelt es sich um eine amerikanische und eine russische Raketenstufe. Ich habe den Fokus auf geostationäre Objekte gelegt, da bei diesen der Abstand zur Erde nahezu konstant ist (siehe Kapitel 2.2.3) und man so die erhaltenen Daten und die daraus errechneten Bahnparameter leicht auf ihre Plausibilität überprüfen kann. Zudem verschwinden geostationäre Objekte während der Beobachtungsdauer niemals unter dem Horizont, da sie für die beobachtende Person von der Erde aus gesehen stillzustehen scheinen. Für meine Beobachtungen

habe ich das Zimlat Teleskop verwendet (siehe sogleich), wobei ich jedoch nur optische Beobachtungen angestellt habe. Zur Auswertung konnte ich eine Software namens Celmech (siehe Kapitel 3.1.3) verwenden.

3.1.2 Benutztes Teleskop (Zimlat)

Das in Abbildung 7 dargestellte Zimlat (Zimmerwald Laser and Astrometry Telescope) ist ein 1997 in Betrieb genommenes Teleskop des Observatoriums Zimmerwald in Bern. Einerseits wird es für Laserdistanzmessungen zu Satelliten verwendet, andererseits als astrometrisches Teleskop, um mit digitalen Kameras erdnahe Objekte, vor allem Weltraumschrott, beobachten zu können. Das Teleskop kann vom Stationscomputer ferngesteuert werden. Jedoch können keine Astrometrie- und Laser-Daten zur selben Zeit gewonnen werden, da die Helligkeit des Laserstrahls die Teleskopaufnahmen verfälschen würde.



Abbildung 7: ZIMLAT (Zimmerwald Laser and Astrometry Telescope). (Abbildung: AIUB, 2018, Teleskope).

3.1.2.1 Aufbau

Zimlat ist ein sogenanntes Ritchey-Crétien Teleskop und besitzt eine Brennweite von 1, 2, 4 oder 8 Metern und eine Apertur (Öffnung) von einem Meter. Für die Beobachtungen habe ich eine Brennweite von 4 Metern benutzt, was zu einem Sichtfeld von $26 \cdot 26$ Bogenminuten (1 Grad entspricht 60 Bogenminuten) führt. Da das Teleskop sowohl für astrometrische Beobachtungen mit verschiedenen Kameras, wie auch für Lasermessungen genutzt wird, ist dessen Aufbau äusserst kompliziert.

Zum Ganzen: AIUB, 2018, Teleskope; SPEKTRUM – WISSEN, 2014, Astronomie für Einsteiger.

3.1.2.2 Ablauf einer Observation

Zuerst muss festgestellt werden, wann, wo und für wie lange das gewünschte Objekt überhaupt zu sehen ist. Dazu werden wie in Abbildung 8 gezeigte Darstellungen der Zeitfenster verwendet, während denen Objekte am Himmel beobachtet werden können.

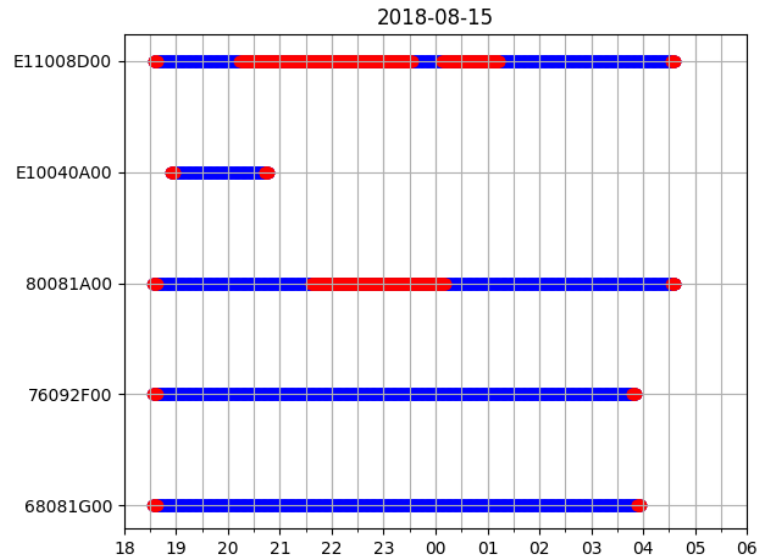


Abbildung 8: Zeitfenster (UTC), während denen Objekte am Himmel beobachtet werden können.
(Abbildung: AIUB, 2018).

Links ist der Name des Objekts angegeben und unten die UTC (koordinierte Weltzeit), welche im Sommer unserer Zeit zwei Stunden nachgeht. Blaue Linien markieren die Zeitspanne, in der das Objekt sichtbar ist, rot die Zeit, in der das Objekt zwar theoretisch sichtbar wäre, jedoch nicht beobachtet werden kann. Dies kann aus verschiedenen Gründen der Fall sein:

- Das Objekt befindet sich im Erdschatten, das heisst die Erde verdeckt das Sonnenlicht komplett, was zur Folge hat, dass das zu observierende Objekt nicht mehr angeschiene wird und daher auf den durch das Astrometrieteleskop erhaltenen Bildern nicht zu sehen ist.
- Das Objekt hat einen zu kleinen Abstand zum hell leuchtenden Mond und kann deshalb nicht auf Bildern erkannt werden.
- Das Objekt befindet sich im Vordergrund der Milchstrasse. Entweder ist das Bild durch die vielen Sterne ebenfalls zu hell oder ein sehr heller Stern im Hintergrund „überstrahlt“ das Objekt.
- Das Objekt befindet sich schon zu nahe am Horizont.

Da das Teleskop bequem vom Computer des Observatoriums auf die richtige Position bewegt und eingestellt werden kann, muss lediglich eine Eingabemaske ausgefüllt werden, um einen Messauftrag zu definieren und die gewünschten Daten zu erlangen. In der Maske kann beispielsweise festgelegt werden, ob die Beobachtungen mit dem Laser- oder dem Astrometrieteleskop gemacht werden sollen und wie viele Aufnahmen mit wie langer Belichtungszeit und Pausen pro Serie zu machen sind.

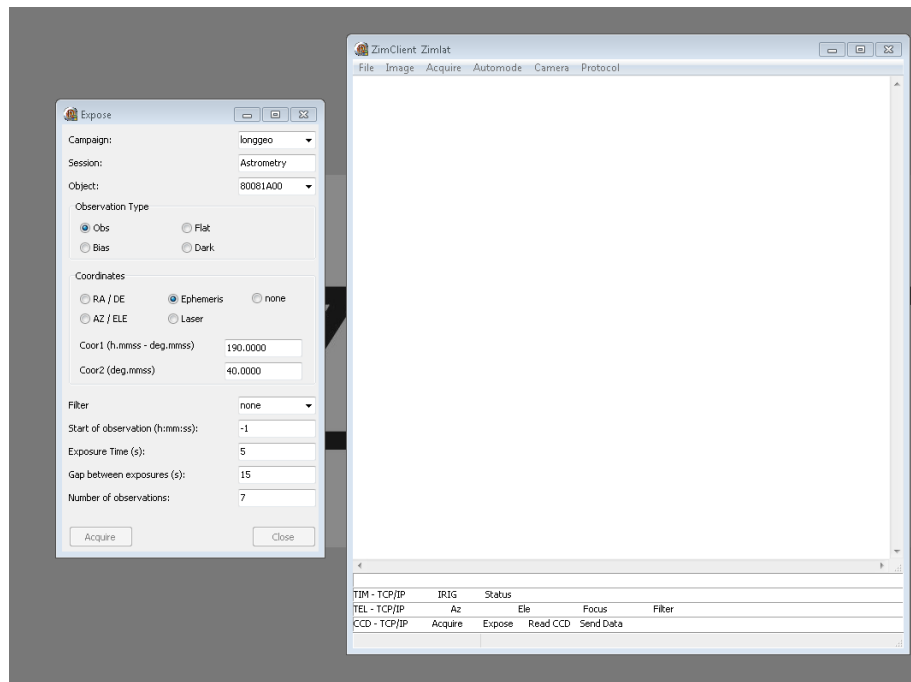


Abbildung 9: Eingabemaske für die Steuerung des Zimlat Teleskops. (Abbildung: AIUB, 2018).

Folgende Einstellungen können in der Maske erfolgen:

- Campaign: Ort, wo sich das zu beobachtende Objekt befindet, bei einem geostationären Objekt entspricht dies der „longgeo campaign“.
- Session: zeigt in diesem Beispiel an, dass die Daten mit dem Astrometrie-Teleskop und nicht mit dem Laser gesammelt werden sollen.
- Object: COSPAR-Bezeichnung des gewünschten Objekts.
- Start of observation: -1 bedeutet, dass die Beobachtungen sofort anfangen, sobald der „acquire“ Knopf gedrückt wird. Es ist aber auch möglich, eine gewünschte Startzeit einzugeben.
- Exposure time: Belichtungszeit.
- Gap between exposures: Zeit zwischen zwei Aufnahmen.
- Number of observations: Anzahl der Beobachtungen pro Serie.

Nach dem Start der Serie kann man das jeweils aktuelle Bild im rechten Fenster sehen, sowie Angaben zur aktuellen Lage des Brennpunktes, zur Zeit und zu den verbleibenden Aufnahmen bis zum Ende der Serie, zur Anzahl schon gewonnener Aufnahmen und zur Temperatur des Teleskops.

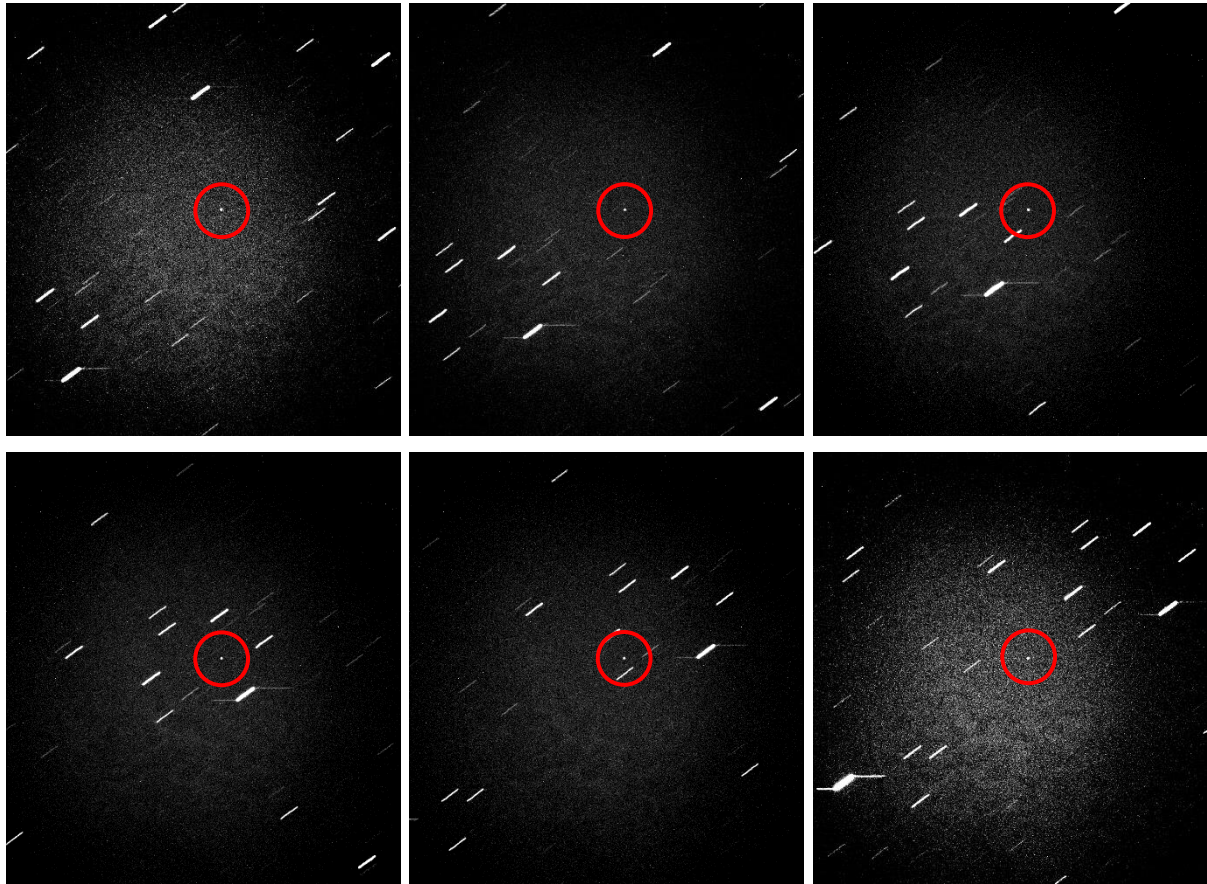


Abbildung 10: Serie von Aufnahmen der Bewegung des Objektes mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G.
(Abbildung: AIUB, 2018).

Wie in Abbildung 10 gezeigt, sind Weltraumschrott-Objekte in den Aufnahmen stets als Punkte zu sehen. Das liegt daran, dass das Teleskop automatisch dem zu beobachtenden Objekt nachgeführt wird. Bei einem perfekt geostationären Objekt wäre diese Nachführung nicht nötig, da das Objekt von der Erde aus gesehen scheinbar stillsteht. Die Striche auf den Aufnahmen stellen Sterne dar. Diese sind als langgezogene Punkte zu sehen, da sich das Teleskop während der Aufnahmen aufgrund der Erdrotation gegenüber dem Sternenhimmel bewegt. Von der Erde aus gesehen scheinen jedoch die Sterne um die Erde zu kreisen. Alle Striche, welche nicht parallel zur scheinbaren Bewegung der Sterne stehen, sind sogenannte Artefakte, das heisst Fehler in der Bildgebung. Generell können Fehler aufgrund verschiedenster Ursachen auftreten:

- Zwei Striche, welche mit einem Stern eine Art spiegelverkehrtes „Z“ bilden, können beispielsweise dadurch entstehen, dass das Teleskop schon mit den Beobachtungen beginnt, obwohl die Blende des Teleskops noch nicht komplett geöffnet ist.
- Ablenkung der vom Objekt reflektierten Lichtstrahlen beim Eintritt oder beim Durchlaufen der Atmosphäre (die Schichtung der verschiedenen Luftschichten ist oftmals nicht stabil).
- Ein nicht genügend gekühltes Teleskop: Zimlat wird auf circa -31 Grad Celsius gekühlt, um thermale Fluktuationen, welche das Bild beeinflussen könnten, zu minimieren.

Die durch die Kamera des Teleskops aufgenommenen Bilder werden vom Computer ausgewertet. Dieser erstellt dann ein Protokoll über die Anzahl Serien und Bilder, die gemacht und die Anzahl an Objekten, die automatisch identifiziert wurden oder noch unbekannt sind.

Für eine eindeutige Bahnbestimmung sind mindestens drei Serien nötig, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen worden sind (beispielsweise mit einer Stunde Unterschied). Theoretisch wären auch nur drei Bilder ausreichend. Je grösser jedoch der Abstand zwischen den beobachteten Positionen ist und je mehr Daten gesammelt werden, desto genauer wird schlussendlich die Bahnbestimmung.

3.1.3 Benutzte Software (Celmech)

Celmech ist eine Sammlung von in der Programmiersprache Python geschriebenen Rechenprogrammen für die Himmelsmechanik, welche von Sam Hidden und Dan Tamayo entwickelt wurde (GITHUB, 2018, Celmech). Die zwei am AIUB benutzten Subprogramme von Celmech heissen ORBDET und SATORB.

ORBDET steht für „Orbit Determination“ (Bahnbestimmung) und berechnet einen sogenannten Initialorbit unter der Annahme, dass für dieses Objekt noch nie eine Bahnbestimmung durchgeführt wurde. Dieser wird dann mit einem vereinfachten Kräftemodell, das nur die abgeflachte Form der Erde und die Störung durch ein drittes Objekt - beispielsweise Mond oder Sonne - berücksichtigt, verbessert. SATORB steht für „Satellite Orbits“ (Satellitenbahnen). Das Programm kann aber auch für sonstige kleine Himmelskörper verwendet werden. Es verbessert eine schon bekannte Bahn, indem es ein komplettes Kräftemodell nutzt, welches alle auf den Körper wirkenden Kräfte berücksichtigt.

3.2 Begriffserklärungen und Definitionen

In Kapitel 3.2 und 3.3 sollen die Grundlagen für die späteren Berechnungen und Auswertungen gelegt werden.

3.2.1 Two Line Elements Format (TLE)

Satellitenbahnelemente können in verschiedenen Formaten aufgeschrieben werden. Eines davon ist das sogenannte NASA/NORAD Two Line Elements Format, kurz TLE. Dieses wird pro Beobachtung immer mit 2 Zeilen angegeben.

Beispiel:

TITAN 3C TRANSTAGE DEB

1 25000U 68081G 18227.85833444 -.00000164 +00000-0 +00000-0 0 9991

2 25000 005.2989 310.9533 0125196 332.2035 051.9675 01.01038061096400

Beschreibung der hier relevanten Zahlengruppen (WIKIPEDIA, 2018, Satellitenbahnelement#Das_Two_Line_Elements_Format_TLE). Zu den einzelnen Begriffen siehe Kapitel 3.2.2:

Titel		
	TITAN 3C TRANSTAGE DEB	Beschreibung des Objekts
Zeile 1		
	1	Zeile Nummer 1
	25000U	NORAD-Katalog-Nummer
	68081G	COSPAR-Bezeichnung
	18	Epoche: entspricht dem Jahr 2018 (20 muss nachträglich hinzugefügt werden)
	227.85833444	Epoche: <ul style="list-style-type: none"> • Zahl vor dem Dezimalpunkt, also 227, entspricht der Anzahl Tage seit Jahresbeginn, d.h. dem 15. August • Zahl nach dem Dezimalpunkt, also 0,85833444, entspricht Tagesbruchteilen, d.h. 20 Stunden, 36 Minuten und circa 0.1 Sekunden
Zeile 2		
	2	Zeile Nummer 2
	25000	NORAD-Katalog-Nummer
	005.2989	Inklination i : entspricht $5,2989^\circ$
	310.9533	Länge des aufsteigenden Knotens Ω : entspricht $310,9533^\circ$
	0125196	Numerische Exzentrizität der Umlaufbahn ε : entspricht $0,0125196$
	332.2035	Argument der Periapsis ω : entspricht $332,2035^\circ$
	051.9675	Mittlere Anomalie M : entspricht $51,9675^\circ$

3.2.2 Bahnparameter

Bahnparameter, auch Bahnelemente genannt, beschreiben die Bewegung und Bahn astronomischer Objekte (siehe Abbildung 11). Zum Ganzen: WIKIPEDIA, 2018, Bahnelement; METZLER, 2007.

Wenn keine Bahnstörungen berücksichtigt werden, reichen zur kompletten Beschreibung einer Bahn, die den Keplerschen Gesetzen folgt, wie beispielsweise eine Ellipse, 6 Elemente: Drei Elemente für die Lage im Raum, zwei Elemente beschreiben die Gestalt der Bahn und ein Element stellt den Zeitpunkt dar, am dem das Objekt einen bestimmten Punkt der Bahn passiert.

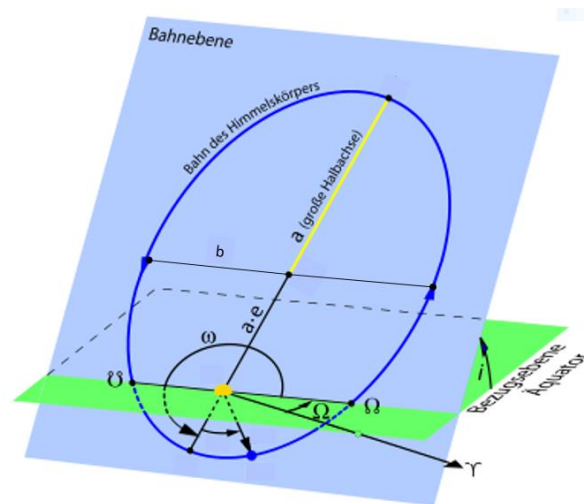


Abbildung 11: Bahnparameter zur Beschreibung der Bewegung von astronomischen Objekten. (Abbildung: WIKIPEDIA, 2017, Bahnelement).

Lageelemente:

- **Inklination:** Die Inklination, auch Bahnneigung genannt, ist der Winkel zwischen der Ebene der Umlaufbahn (Bahnebene) und einer Referenzebene. Die Referenzebene ist bei Objekten in einer Erdumlaufbahn meist die Äquatorebene. Die Inklination wird mit dem Symbol i bezeichnet (WIKIPEDIA, 2018, Bahnelement; METZLER, 2007).
- **Länge des aufsteigenden Knotens:** Dies ist der Winkel zwischen der Knotenlinie, gemessen vom aufsteigenden Knoten her, und der im Sonnensystem raumfesten Linie zum Frühlingspunkt, einer Verbindungslinie zwischen Erdmittelpunkt und Frühlingspunkt. Dieser Winkel wird oftmals mit einem Ω bezeichnet.
 - Knotenlinie: Die Knotenlinie ist die Verbindungsgerade zwischen den zwei Knoten, welche die Schnittpunkte der Bahn mit einer Bezugsebene, hier der Äquatorebene, darstellen.
 - Aufsteigender Knoten: Der aufsteigende Knoten ist der Punkt, an dem die Bahn die Bezugsebene von Süden nach Norden durchstösst (Ω). Der zweite Knoten wird absteigender Knoten genannt (ϖ).

- **Frühlingspunkt:** Der Frühlingspunkt ist der Schnittpunkt des Himmelsäquators, einem Schnittkreis zwischen einer durch den Äquator definierten Ebene und der scheinbaren Himmelskugel, und der Ekliptik. Die Ekliptik ist die scheinbare Bahn der Sonne, die sich von der Erde aus betrachtet ergibt (WIKIPEDIA, 2018, Länge_des_aufsteigenden_Knotens; WIKIPEDIA, 2018, Äquator#Himmelsäquator, WIKIPEDIA, 2018, Frühlingspunkt, WIKIPEDIA, 2018, Knoten_(Astronomie), WIKIPEDIA, 2018, Ekliptik). In Abbildung 11 ist die Linie zum Frühlingspunkt mit dem Zeichen γ markiert.
- **Argument der Periapsis:** Das Argument der Periapsis ist der Winkel zwischen dem aufsteigenden Knoten und der Periapsis (bei Objekten in einer Erdumlaufbahn auch Perigäum genannt), welche den Punkt auf der Bahn des Objekts darstellt, an dem dieses seinem Zentralkörper am nächsten ist. Das Argument der Periapsis wird mit einem ω bezeichnet (WIKIPEDIA, 2018, Erdnähe; WIKIPEDIA, 2018, Apsis_(Astronomie)).

Gestaltelemente

- **Grosse Halbachse:** Die grosse Halbachse a wird durch die halbe Länge des grössten Durchmessers einer Ellipse definiert. Die kleine Halbachse b wird durch die halbe Länge des kleinsten Durchmessers einer Ellipse definiert. Die kleine und die grosse Halbachse stehen in einem 90° Winkel zueinander. Bei einem Kreis, einer speziellen Ellipse, gilt $a = b$. Die Halbachsen entsprechen dann dem Radius (WIKIPEDIA, 2018, Halbachsen_der_Ellipse).
- **Numerische Exzentrizität:** Die Exzentrizität wird oft auf ein anderes Bahnelement bezogen und somit als numerische Exzentrizität gebraucht. Bei elliptischen Bahnen beispielsweise bezieht sich die Exzentrizität auf die grosse Halbachse. Die numerische Exzentrizität wird normalerweise mit ε , die „normale“ Exzentrizität mit e angegeben. Die Exzentrizität kann folgende Werte annehmen:
 - $e = 0$ entspricht einer exakt kreisförmigen Bahn.
 - $0 < e < 1$ (e zwischen 0 und 1) entspricht einer elliptischen Bahn. Je mehr sich die Werte von e 1 annähern, desto langgezogener erscheint die Ellipse.
 - $e = 1$ entspricht einer parabolischen Bahn.
 - $e > 1$ (e grösser als 1) entspricht einer hyperbolischen Bahn. Je grösser der Wert von e ist, desto offener die Hyperbel.

Somit sind nur Bahnen mit Werten von e kleiner als 1 geschlossene Umlaufbahnen, die mehrmals durchlaufen werden, im Gegensatz zu Werten von e grösser oder gleich 1, die parabolische oder hyperbolische Bahnen darstellen, die nur einmal durchlaufen werden.

- Die kleine Halbachse kann mit der Formel $b^2 = a^2 - (ae)^2$ berechnet werden (METZLER, 2007).
 - Somit entspricht die Exzentrizität der Formel $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$
- (WIKIPEDIA, 2018, Exzentrizität_(Astronomie)).

Zeitbezug

Der Zeitbezug kann durch verschiedene Werte, wie beispielsweise die wahre oder mittlere oder exzentrische Anomalie angegeben werden. Hier wird jedoch nur auf die mittlere Anomalie eingegangen.

- **Mittlere Anomalie:** Bei der mittleren Anomalie wird angenommen, dass die Winkelgeschwindigkeit konstant bleibt. Hierfür bedient man sich eines fiktiven Körpers, der in einer fiktiven Kreisbahn um die Bahnellipse des Objekts gelegt wird (siehe Abbildung 12). Dabei berühren sich die zwei Bahnen in der Periapsis, das wahre und das fiktive Objekt besitzen die gleiche Umlaufzeit. Die wahre Anomalie kann mit dieser Formel berechnet werden:

$$M = 2\pi \frac{t - t_p}{U}$$

Dabei entspricht:

- M der mittleren Anomalie
- U der Bahnperiode
- $\frac{2\pi}{U}$ der konstanten Winkelgeschwindigkeit

Im Zeitpunkt t_p befindet sich das Objekt (wahres und fiktives) in der Periapsis. t ist die gleichmässig vergangene Zeit bis das fiktive Objekt seine gewünschte Position auf der Kreisbahn erreicht hat (WIKIPEDIA, 2018, Kepler_Gleichung).

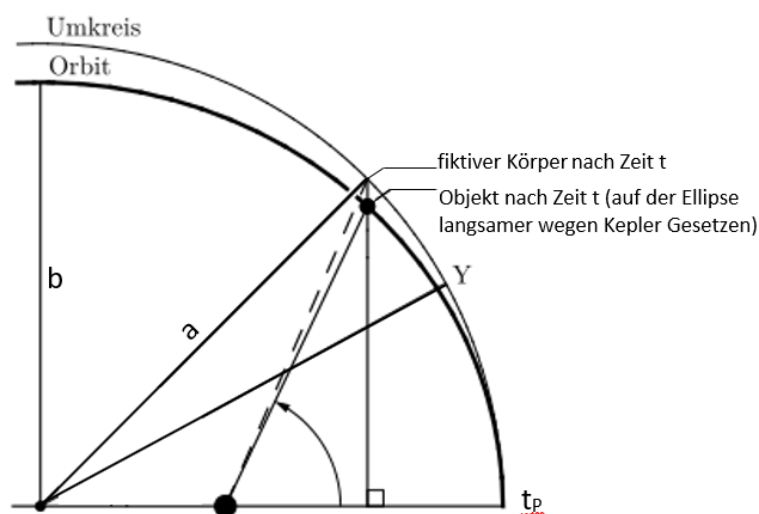


Abbildung 12: Definition der mittleren Anomalie M . (Abbildung: WIKIPEDIA, 2018, Kepler-Gleichung).

3.2.3 Weitere Begriffe

- **Deklination:** Die Deklination wird zur Positionsangabe von Himmelskörpern auf der gedachten Himmelssphäre verwendet. Sie bezeichnet den Erhebungswinkel über dem Himmelsäquator. Dabei entsprechen Werte auf der nördlichen Halbkugel positiven, solche auf der südlichen Halbkugel negativen Werten. Die beiden Himmelspole werden dabei mit $+90^\circ$ respektive -90° angegeben. Die Deklination ist mit der geografischen Breite auf der Erde gleichzusetzen (Wikipedia, 2018, Deklination_(Astronomie)).

Üblicherweise wird die Deklination in der Form [dd.mmssxxx] angegeben:

dd	Grad (englisch: degrees)	Wertebereich von $+90^\circ$ bis -90°
mm	Minuten (englisch: minutes)	1 Grad entspricht 60 Sekunden
ss	Sekunden (englisch: seconds)	1 Sekunde entspricht 1000 Millisekunden
xxx	Bruchteile von Sekunden	Gemessen in Einheiten von 10^{-3} Sekunden

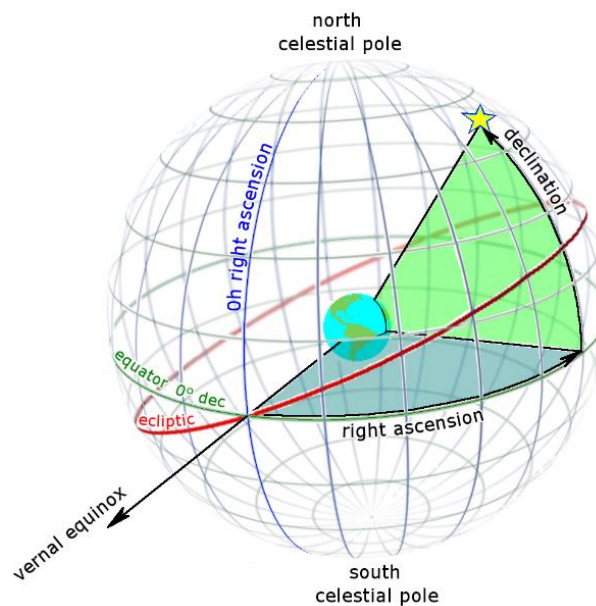


Abbildung 13: Definition von Rektaszension (right ascension) und Deklination (declination) zur Beschreibung der Position von astronomischen Objekten. (Abbildung: WIKIPEDIA, 2018, Right ascension).

- **Rektaszension:** Auch die Rektaszension wird zur Positionsangabe von Himmelskörpern auf der gedachten Himmelssphäre verwendet. Sie bezeichnet den auf den Himmelsäquator bezogenen Winkel zwischen dem Stundenkreis, auf dem sich das Objekt befindet, und dem Frühlingspunkt. Die Rektaszension ist mit der geographischen Länge auf der Erde gleichzusetzen (WIKIPEDIA, 2018, Rektaszension).

Üblicherweise wird die Rektaszension in der Form [hh.mmssxxxx] angegeben:

hh	Stunden (englisch: hours)	Wertebereich von 0 bis 24
mm	Minuten (englisch: minutes)	1 Stunde entspricht 60 Minuten
ss	Sekunden (englisch: seconds)	1 Minute entspricht 60 Sekunden
xxxxx	Bruchteile von Sekunden	Gemessen in Einheiten von 10^{-5} Sekunden

- **COSPAR-Bezeichnung:** Diese astronomische Bezeichnung ist eine vom COSPAR (Committee on Space Research) vergebene Katalognummer von Raumflugkörpern, die eine Umlaufbahn besitzen (WIKIPEDIA, 2018, COSPAR-Bezeichnung; WIKIPEDIA, 2018, Committee_on_Space_Research).
- **Julianisches Datum:** Das julianische Datum, im Englischen auch Julien Date (JD) genannt, jedoch nicht mit dem Datum aus dem julianischen Kalender zu verwechseln, gibt die Anzahl Tage an, die seit dem 1. Januar 4713 v. Chr., 12:00 Uhr, vergangen ist. Somit ist das Julianische Datum nicht von Unregelmässigkeiten wie Schalttagen betroffen. Die Anzahl vergangener Tage wird dabei als ganze Zahl, die vergangenen Tagesbruchteile als Nachkommastellen angegeben.

Das **Modifizierte Julianische Datum**, im Englischen Modified Julian Date (MJD) genannt, hat seinen Nullpunkt am 17. November 1858, 0:00 Uhr. Das Modifizierte Julianische Datum besitzt daher viel weniger Vorkommastellen als das Julianische Datum (WIKIPEDIA, 2018, Julianisches_Datum).

- **Zentripetalkraft:** Die Zentripetalkraft ist die Kraft, die auf ein Objekt auf einer Kreisbahn wirkt und verhindert, dass das Objekt weiter seinem momentanen Geschwindigkeitsvektor folgt und sich somit auf einer Geraden bewegt. Sie wirkt vom Objekt zum Mittelpunkt des Kreises und steht senkrecht zum momentanen Geschwindigkeitsvektor. Diese Kraft entspricht bei Objekten in einem Erdorbit der Gravitationskraft der Erde (WIKIPEDIA, 2018, Zentripetalkraft).

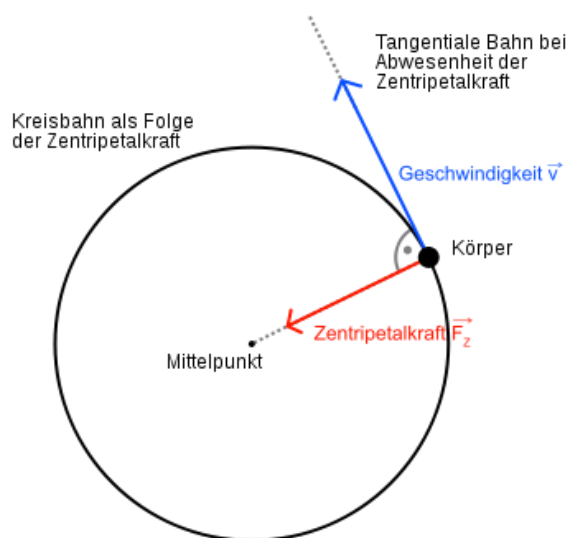


Abbildung 14: Die Zentripetalkraft zwingt den Körper auf eine Kreisbahn. (Abbildung: WIKIPEDIA, 2018, Zentripetalkraft).

- **Gravitationskraft:** Die Gravitationskraft hat die Anziehung von Massen zur Folge. Sie nimmt mit zunehmender Distanz zwischen den Massen ab, verschwindet jedoch nie (WIKIPEDIA, 2018, Gravitation).
- **Zentralkörper:** Ein Zentralkörper ist ein Objekt, das im Zentrum anderer, um es kreisende Objekte steht, wie zum Beispiel die Erde.

3.3 Berechnungsgrundlagen

3.3.1 Analytische Berechnung der Winkelgeschwindigkeit

Zur Berechnung der (momentanen) Winkelgeschwindigkeit zwischen zwei Beobachtungspunkten müssen einerseits die Zeitdifferenz und andererseits die Winkeldifferenz bestimmt werden.

- **Zeitdifferenz**

Die Zeitdifferenz kann direkt aus dem Unterschied im Modifizierten Julianischen Datum (Abkürzung: MJD) der Messpunkte bestimmt werden:

$$\Delta t = MJD_2 - MJD_1$$

Δt Zeitdifferenz in Sekunden

MJD_1 Modifiziertes Julianisches Datum des ersten Beobachtungspunkts

MJD_2 Modifiziertes Julianisches Datum des zweiten Beobachtungspunkts

- **Winkeldifferenz**

Zur Berechnung der Winkeldifferenz sind mehrere Schritte erforderlich:

1. Umrechnung der Rektaszension (Abkürzung: RA) von Zeiteinheiten in Winkeleinheiten (von Stunden in Sekunden und dann in Radiant). Dabei ist zu beachten, dass die Zeiteinheiten nicht im Dezimalsystem angegeben sind, sondern in der speziellen Schreibweise [hh.mmssxxxx].

Beispiel: 1.20 Stunden

- Im Dezimalsystem entspricht dies 1 Stunde und 12 Minuten, also 72 Minuten ($1.20 \cdot 60$ Minuten = 72 Minuten).
- In der hier verwendeten Schreibweise entspricht dies jedoch 1 Stunde und 20 Minuten, also 80 Minuten (1 Stunde + 20 Minuten = 80 Minuten).

Rechenweg:

$$\Delta h_{RA} = hh_2 - hh_1$$

$$\Delta m_{RA} = \Delta h_{RA} * 60 + (mm_2 - mm_1)$$

$$\Delta s_{RA} = \Delta m * 60 + (ssxxxxx_2 - ssxxxxx_1)$$

Ein kompletter Umlauf entspricht 24 Stunden oder 2π Radiant. Da 1 Stunde $60 \cdot 60 = 3600$ Sekunden hat, ergibt sich der Unterschied in der Rektaszension im Bogenmass zu:

$$\Delta RA = \Delta s_{RA} * \frac{2\pi}{3600 * 24}$$

Δh_{RA} Winkeldifferenz der Rektaszension in Stunden

Δm_{RA} Winkeldifferenz der Rektaszension in Minuten

Δs_{RA} Winkeldifferenz der Rektaszension in Sekunden

ΔRA Winkeldifferenz der Rektaszension in Radiant

2. Umrechnung der Deklination (Abkürzung: DEC, Schreibweise [dd.mmssxxx]) von Grad in Radiant

Rechenweg:

$$\Delta d_{DEC} = dd_2 - dd_1$$

$$\Delta m_{DEC} = \Delta d_{DEC} * 60 + (mm_2 - mm_1)$$

$$\Delta s_{DEC} = \Delta m_{DEC} * 60 + (ssxxx_2 - ssxxx_1)$$

Ein kompletter Umlauf entspricht 360 Grad oder 2π Radiant. Da 1 Grad $60 \cdot 60 = 3600$ Bogensekunden hat, ergibt sich der Unterschied in der Rektaszension im Bogenmass zu:

$$\Delta DEC = \Delta s_{DEC} * \frac{2\pi}{3600 * 360}$$

Δd_{DEC} Winkeldifferenz der Deklination in Grad

Δm_{DEC} Winkeldifferenz der Deklination in Bogenminuten

Δs_{DEC} Winkeldifferenz der Deklination in Bogensekunden

ΔDEC Winkeldifferenz der Deklination in Radiant

Aus der Winkeldifferenz und der Zeitdifferenz lässt sich die (momentane) Winkelgeschwindigkeit berechnen:

$$\omega_{RA} = \frac{\Delta RA}{\Delta t}$$

$$\omega_{DEC} = \frac{\Delta DEC}{\Delta t}$$

Da die beiden Winkelgeschwindigkeiten (ebenso wie Rektaszension und Deklination) senkrecht aufeinander stehen, ergibt sich die resultierende Winkelgeschwindigkeit unter Anwendung des Satzes von Pythagoras zu:

$$\omega = \sqrt{\omega_{RA}^2 + \omega_{DEC}^2}$$

- ω_{RA} Winkelgeschwindigkeit der Rektaszension in Radiant pro Sekunde
- ω_{DEC} Winkelgeschwindigkeit der Deklination in Radiant pro Sekunde
- ω Resultierende Winkelgeschwindigkeit in Radiant pro Sekunde

3.3.2 Analytische Berechnung von Bahnradius und -geschwindigkeit

Aus der Winkelgeschwindigkeit lässt sich mit Hilfe des Gravitationsgesetzes von Newton der Bahnradius bestimmen. Zum Ganzen: METZLER, 2007, Kapitel 2.1.4; PHYSICS FOR YOU, 2015 Kapitel 7.

Die Zentripetalkraft $F_Z = m\omega^2 r_B$, die einen Satelliten auf einer Kreisbahn um seinen Zentralkörper (hier: Erde) hält, ist durch die Gravitationskraft $F = GmM/r_B^2$ des Zentralkörpers gegeben. Beim Gleichsetzen beider Terme kürzt sich die Masse m des Satelliten heraus und es ergibt sich für den Bahnradius:

$$r_B = \sqrt[3]{\frac{GM}{\omega^2}}$$

- r_B Bahnradius in Metern, gemessen ab dem Mittelpunkt der Erde
- G Gravitationskonstante, $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$
- M Erdmasse, $M = 5,9722 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ (WIKIPEDIA, 2018, Erdmasse)
- ω Winkelgeschwindigkeit

Aus dem Bahnradius (vom Erdmittelpunkt aus gemessen) lässt sich die Bahnhöhe (von der Erdoberfläche aus gemessen) berechnen:

$$h_B = r_B - R_A$$

h_B Bahnhöhe in Metern, gemessen von der Erdoberfläche aus

R_A Äquatorradius des mittleren Erdellipsoids (international festgelegter Wert der grossen Halbachse a des GRS 80), $R_A = 6'378'137 \text{ m}$ (WIKIPEDIA, 2018, Erdradius)

Mit dem Bahnradius und der Winkelgeschwindigkeit ergibt sich die Bahngeschwindigkeit:

$$v_B = \omega r_B$$

3.3.3 Analytische Berechnung der Inklination

Für die Berechnung der mit dem Symbol i bezeichneten Inklination der Bahnebene gegenüber der Äquatorebene geht man wie folgt vor:

Der Winkel zwischen zwei Ebenen ergibt sich aus dem Skalarprodukt der Normalenvektoren dieser Ebenen (MATHCENTRE, 2009, The scalar product). Ein Normalenvektor steht senkrecht auf einer Ebene und definiert damit deren Orientierung im Raum (MATHCENTRE, 2009, The vector product). Zum Aufstellen der Normalenvektoren bietet es sich an, in Kugelkoordinaten zu arbeiten (WIKIPEDIA, 2018, Kugelkoordinaten). Im Gegensatz zu einem kartesischen Koordinatensystem, das durch die Achsen x , y und z bestimmt ist, wird die Lage eines Punktes P in Kugelkoordinaten durch den Radius r , den Polwinkel θ und den Azimutwinkel φ angegeben.

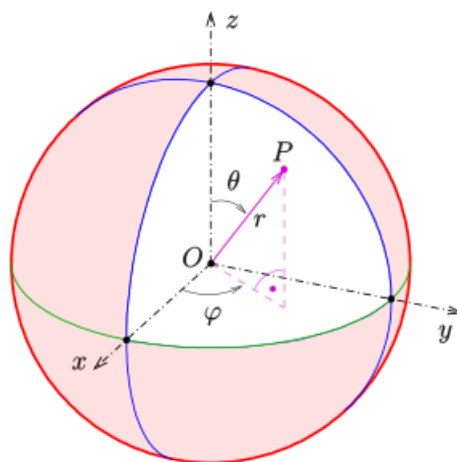


Abbildung 15: Kugelkoordinaten. (Abbildung: WIKIPEDIA, 2018, Kugelkoordinaten).

Der Normalenvektor der Äquatorebene lässt sich einfach hinschreiben:

Kartesische Koordinaten:
$$\vec{n}_A = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kugelkoordinaten:
$$\vec{n}_A = \begin{bmatrix} r \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Für die Berechnung des Normalenvektors der Bahnebene benötigt man die kartesischen Ortsvektoren zu zwei Bahnpunkten P und Q , die die Ebene aufspannen. Das Kreuzprodukt der beiden Vektoren $\vec{p} = \overrightarrow{OP}$ und $\vec{q} = \overrightarrow{OQ}$ liefert den gewünschten Normalenvektor:

$$\vec{n}_B = \vec{p} \times \vec{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (p_y q_z - p_z q_y) \\ (p_z q_x - p_x q_z) \\ (p_x q_y - p_y q_x) \end{bmatrix}$$

Die grösste Genauigkeit wird erreicht, wenn die Vektoren zu den zwei Punkten P und Q auf der Kugeloberfläche einen Abstand von 90° besitzen, also senkrecht aufeinander stehen.

Den Winkel zwischen den beiden Normalenvektoren \vec{n}_A und \vec{n}_B erhält man aus deren Skalarprodukt:

$$\vec{n}_A \cdot \vec{n}_B = |\vec{n}_A| |\vec{n}_B| \cos(i) = n_{Ax} n_{Bx} + n_{Ay} n_{By} + n_{Az} n_{Bz}$$

wobei

$$|\vec{n}_A| = \sqrt{(n_{Ax})^2 + (n_{Ay})^2 + (n_{Az})^2}$$

$$|\vec{n}_B| = \sqrt{(n_{Bx})^2 + (n_{By})^2 + (n_{Bz})^2}$$

und

$$i = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{n}_A \cdot \vec{n}_B}{|\vec{n}_A| |\vec{n}_B|} \right)$$

Da die gemessenen Koordinaten der Bahnpunkte als Rektaszension und Deklination gegeben sind, müssen diese zuerst in Kugelkoordinaten und dann in kartesische Koordinaten umgewandelt werden:

Polarwinkel: $\theta = 90^\circ - \text{Deklination in Grad}$

Azimutwinkel: $\varphi = \text{Rektaszension in Grad}$

$$n_{Ax} = r \sin \theta \cos \varphi$$

$$n_{Ay} = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$n_{Az} = r \cos \theta$$

Für den Radius kann ein beliebiger Wert eingesetzt werden, zum Beispiel $r = 1$, da sich durch die Betragbildung beim Skalarprodukt die Länge der Vektoren herauskürzt.

3.3.4 Vergleich mit früheren Daten

Um die Frage zu beantworten, ob sich die Bahn eines Weltraumschrott-Objekts im Lauf der Zeit verändert, soll die Entwicklung der Bahnen der zwei von mir beobachteten Raketenstufen über einen Zeitraum von circa 20 Jahren untersucht werden. Dafür habe ich mich bei space-track.org (TLE-KATALOG, 2018, Space-Track.org) registriert, einer US-amerikanischen Webseite, auf der unter anderem historische Daten von Weltraumobjekten zu finden sind. So konnte ich, nachdem ich den TLE Katalog heruntergeladen, umgeformt und in Excel übertragen hatte, die Entwicklung der Bahnparameter als Funktion der Zeit darstellen.

3.3.5 Bahnbestimmung durch die Celmech Software

Die mir am AUIB zur Verfügung gestellte Celmech Software ermöglichte es mir zum einen, die Daten, die ich durch die Beobachtung der beiden Objekte erhalten habe, mit den Daten aus dem TLE Katalog zu vergleichen. Dazu nahm ich bei beiden Objekten eine Bahnbestimmung und Bahnverbesserung mit der Software vor und verglich, welcher der beiden Datensätze eine höhere Standardabweichung der jeweiligen Bahnparameter besass. So liess sich überprüfen, ob die gesammelten Daten zuverlässig sind, denn je höher die Standardabweichung der Daten ist, desto unzuverlässiger sind diese.

Zum anderen habe ich Daten von zwei Beobachtungstagen mit solchen von drei Beobachtungstagen verglichen. Dabei habe ich bei diesen Daten wiederum mit ORBDET und SATORB zuerst eine Bahnbestimmung und anschliessend eine Bahnverbesserung durchgeführt, um den Unterschied in der Genauigkeit der Bahnparameter zu sehen. Theoretisch sollten die Daten von drei Tagen eine kleinere Standardabweichung besitzen und somit ein präziseres Resultat für die Bahnparameter liefern als die Daten von zwei Tagen, da mehr Datenpunkte berücksichtigt wurden.

3.4 Beobachtete Objekte

3.4.1 Amerikanische Raketenstufe (Objekt 68081G)

3.4.1.1 Beschreibung des Objekts

Das Objekt mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G ist die Oberstufe einer Titan IIIC Trägerrakete. Dieser Raketentyp wurde zwischen 1965 bis 1982 von der amerikanischen Air Force benutzt. Die beobachtete dritte Stufe ist eine sogenannte Transtage, die konstruiert wurde, um militärische Fracht in einen geostationären Orbit zu bringen (WIKIPEDIA, 2018, Titan_(Trägerrakete); WIKIPEDIA, 2018, Transtage; WIKIPEDIA, 2018, Titan_IIIC).

Aus der COSPAR-Bezeichnung ist abzulesen, dass das Objekt 1968 gestartet wurde und den 81. Raketenstart dieses Jahres darstellte (WIKIPEDIA, 2018, COSPAR-Bezeichnung).

3.4.1.2 Resultate und Interpretation der Ergebnisse

Wie in Abbildung 16 an den zwei grossen Sprüngen zwischen den sonst nahezu linear aufgereihten Punkten zu erkennen ist, wurde die Beobachtung dieses Objekts in drei verschiedenen Nächten durchgeführt. Die treppenstufenartigen Sprünge am zweiten und dritten Tag sind darauf zurückzuführen, dass die verschiedenen Messserien mit einem Abstand von circa einer Stunde aufgenommen wurden. Aufgrund des schlechten Wetters in der ersten Hälfte der ersten Nacht lagen die Messserien näher zusammen, weshalb dort die Sprünge nur schwer zu erkennen sind. Eine Tabelle aller Messwerte (Modifiziertes Julianisches Datum, Rektaszension, Deklination) und der daraus berechneten Winkelgeschwindigkeiten ist im Anhang A zu finden.

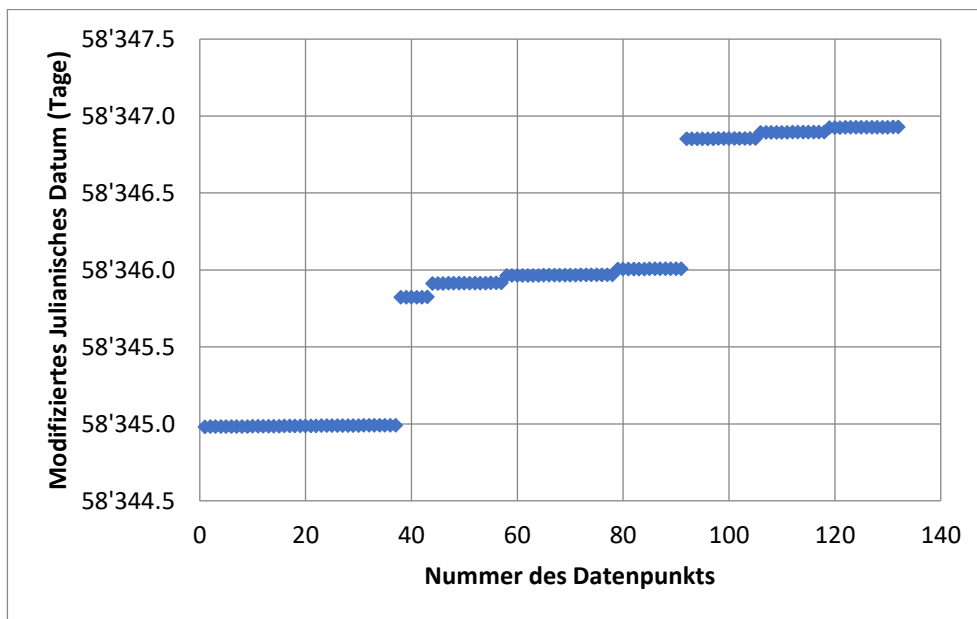


Abbildung 16: Objekt 68081G – Beobachtungszeit über der Nummer des Datenpunkts. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

3.4.1.2.1 Graphische Darstellung der Messwerte für Rektaszension und Deklination

Als repräsentatives Beispiel zeigt Abbildung 17 die Rektaszension als Funktion der Beobachtungsdauer an einem der drei Tage. Auffallend ist der Sprung der Werte zwischen 3800 und 6300 Sekunden, der durch den Übergang der Rektaszension von 360° zu 0° entsteht. Vor und nach dem Sprung steigt die Rektaszension in erster Näherung linear an, was die Hypothese einer Kreisbahn unterstützen würde. Wegen der vergleichsweise kurzen Beobachtungszeiten lässt sich diese Vermutung jedoch mit den vorhandenen Daten nicht erhärten.

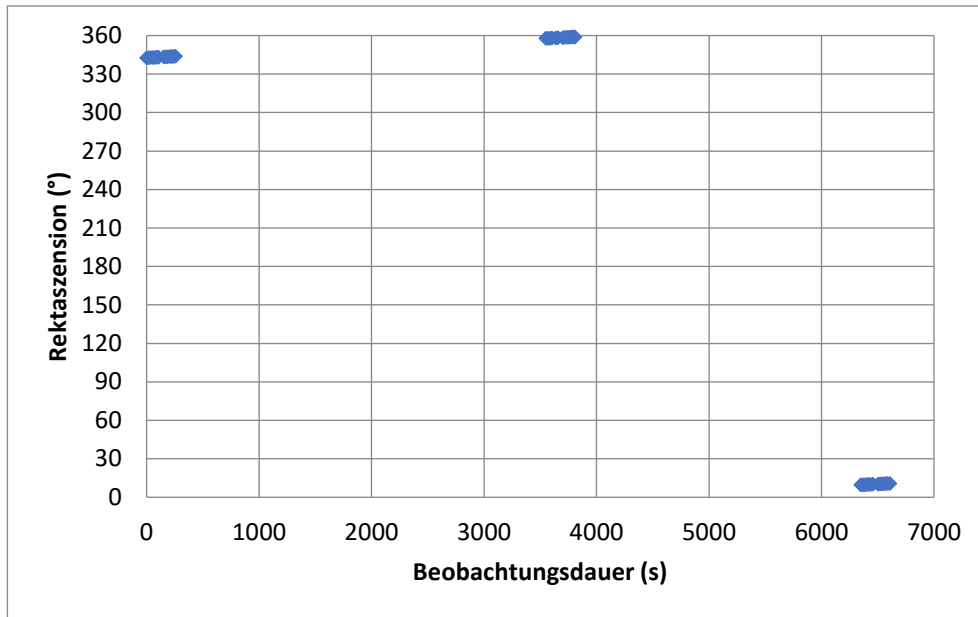


Abbildung 17: Objekt 68081G – Rektaszension über der Beobachtungsdauer – Tag 3 (Messung vom 16.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Bei einem sich auf einer idealen, geostationären Bahn befindlichen Objekt wäre die Deklination 0° . Abbildung 18 zeigt jedoch, dass das Objekt zum Zeitpunkt der Beobachtung gegenüber der Äquator-ebene gegen Süden verschoben ist.

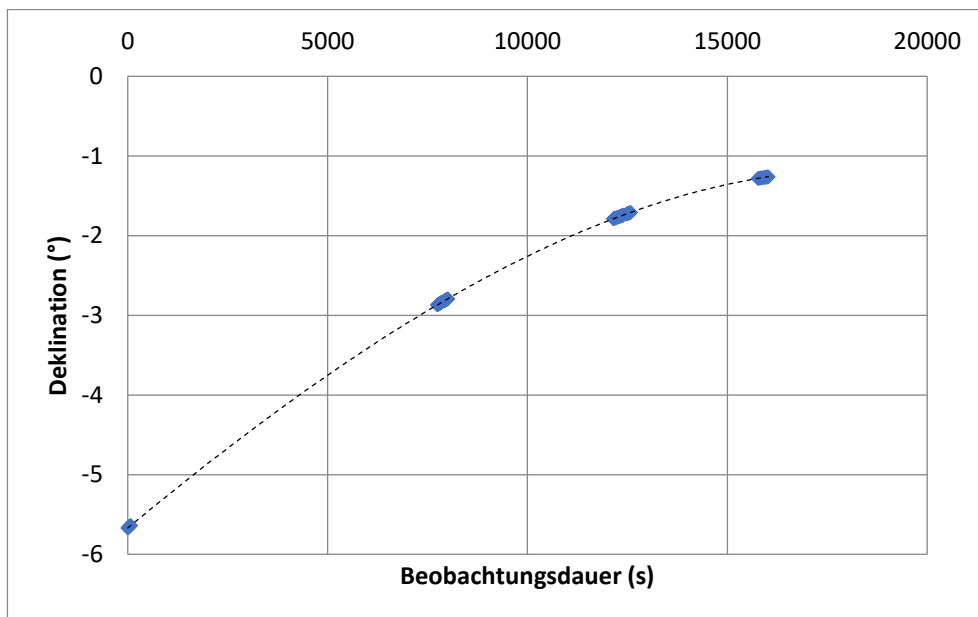


Abbildung 18: Objekt 68081G – Deklination über der Beobachtungsdauer – Tag 2 (Messung vom 15.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Der Bogen, den man beim Verbinden der Messpunkte sehen würde, lässt zudem darauf schliessen, dass die Bahnebene des Objekts gegenüber der Äquatorebene geneigt ist. Die bedeutet, dass die Deklination zuerst grösser und dann wieder kleiner wird. Somit sprechen die gemessenen Werte für die Deklination gegen eine perfekte geostationäre Bahn.

3.4.1.2.2 Auswertung von Winkelgeschwindigkeit, Bahnhöhe und Bahngeschwindigkeit

Unter der Annahme einer Kreisbahn lassen sich aus dem Mittelwert der Winkelgeschwindigkeiten durch Anwendung der im Kapitel 3.3.2 dargestellten Formeln der Bahnradius und die Bahngeschwindigkeit bestimmen:

Tabelle 1: Objekt 68081G – Bahnhöhe und -geschwindigkeit unter Annahme einer Kreisbahn.

Anzahl der Datenpunkte:	131
Mittelwert der Winkelgeschwindigkeit:	7,39110 10 ⁻⁵ rad/s
Minimum:	7,30097 10 ⁻⁵ rad/s
Maximum:	7,52952 10 ⁻⁵ rad/s
Standardabweichung:	5,13280 10 ⁻⁷ rad/s
Berechneter Bahnradius (gemessen ab dem Erdmittelpunkt):	41'786,33 km
Berechnete Bahnhöhe (gemessen ab der Erdoberfläche):	35'408,19 km
Berechnete Bahngeschwindigkeit:	3'088,47 m/s

Vergleicht man die berechneten Ergebnisse mit den theoretischen Daten der geostationären Umlaufbahn, für die eine Winkelgeschwindigkeit von

$$\omega = \frac{2\pi}{3600 \cdot 24} \text{ rad/s (also 1 kompletter Umlauf pro Tag)}$$

gilt, ergeben sich kleine Unterschiede:

Tabelle 2: Objekt 68081G – Vergleich von Bahnhöhe und -geschwindigkeit mit der theoretischen GEO Bahn.

	Berechnete Daten für das Objekt 68081G	Theoretische Daten für die GEO-Bahn	Abweichung	
Bahnradius:	41'786,33 km	42'240,54 km	-454,21 km	-1.1%
Bahnhöhe:	35'408,19 km	35'862,40 km	-454,21 km	-1.3%
Bahngeschwindigkeit:	3'088,47 m/s	3'071,82 m/s	+16,47 m/s	+0.5%

Der berechnete Bahnradius liegt um circa 454 km unterhalb der geostationären Bahn und somit im Bereich des Friedhofsorbits. Da sich die Bahn unterhalb des theoretische GEO Orbits befindet, muss sich das Objekt schneller bewegen, um nicht auf die Erde zurückzufallen (wegen der auf der niedrigeren Bahn wirkenden grösseren Gravitationskraft).

Um zu überprüfen, ob die oben getroffene Annahme einer Kreisbahn korrekt ist, wird wie in Kapitel 3.3.1 gezeigt aus der Winkel- und Zeitdifferenzen von aufeinanderfolgenden Beobachtungspunkten die momentane Winkelgeschwindigkeit berechnet. Bei einem idealen, geostationären Objekt wäre die Winkelgeschwindigkeit konstant und entspräche dem theoretischen Wert von 7.27221 10⁻⁵ rad/s (siehe Tabelle 1). In Abbildung 20 (Tag 2) und Abbildung 21 (Tag 3) ist jedoch ein deutlicher

Abwärtstrend zu erkennen. Zudem liegen alle Werte über dem theoretischen Wert, wie schon in Tabelle 1 gesehen. Auch diese Veränderung der Winkelgeschwindigkeit über der Zeit lässt wegen des 2. Keplerschen Gesetzes darauf schliessen, dass sich das Objekt nicht auf einer Kreisbahn, sondern auf einer elliptischen Bahn bewegt. Am ersten Tag (Abbildung 19) schwankt die Winkelgeschwindigkeit scheinbar um einen konstanten Wert. Dies kann jedoch darauf zurückzuführen sein, dass die Messergebnisse nur über einen sehr kurzen Zeitraum aufgenommen wurden und der an den beiden anderen Tagen beobachtete Abwärtstrend somit nicht sichtbar ist.

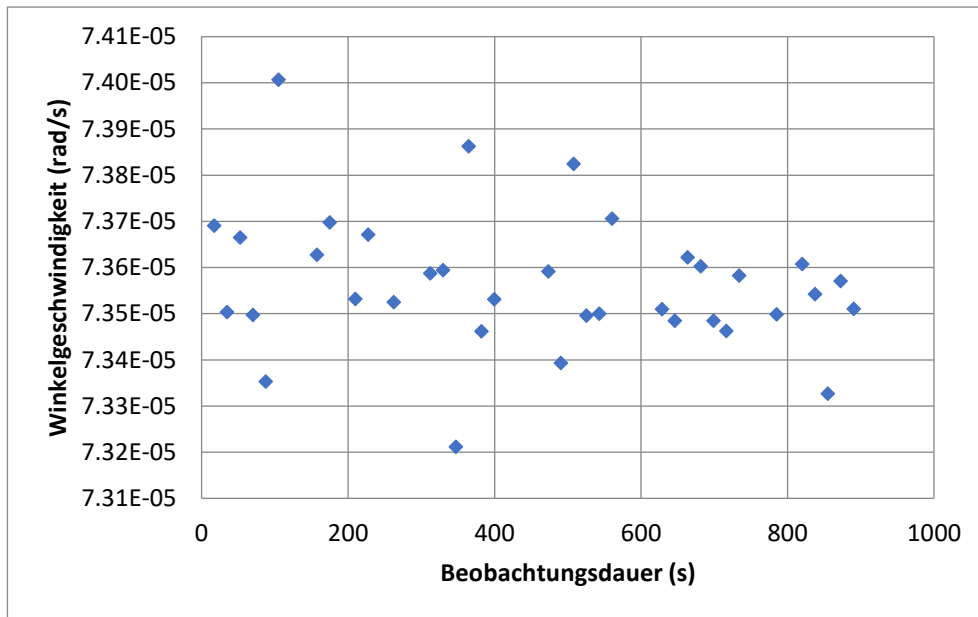


Abbildung 19: Objekt 68081G – Winkelgeschwindigkeit über der Beobachtungsdauer – Tag 1 (Messung vom 14.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

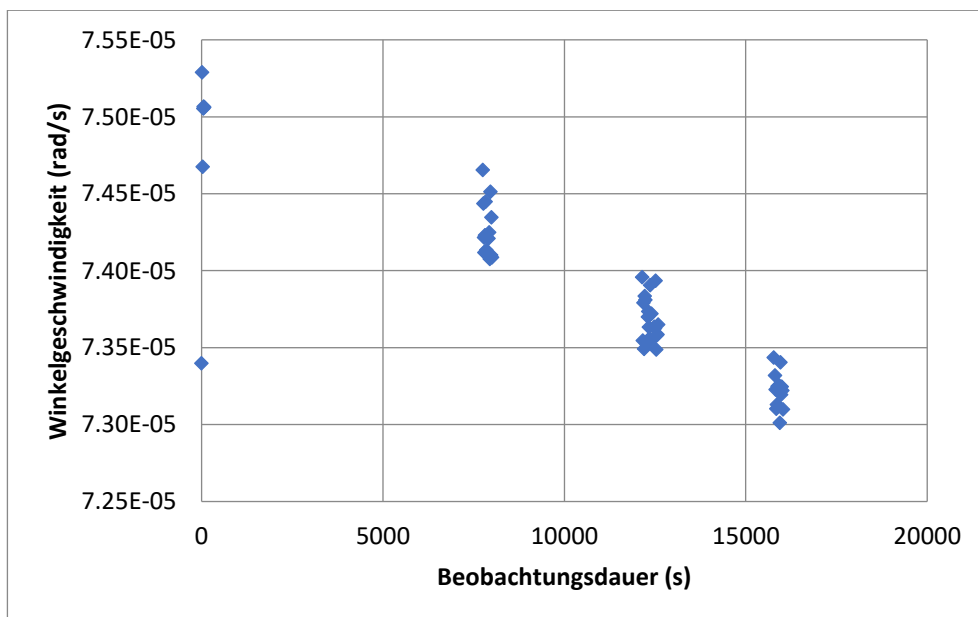


Abbildung 20: Objekt 68081G – Winkelgeschwindigkeit über der Beobachtungsdauer – Tag 2 (Messung vom 15.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

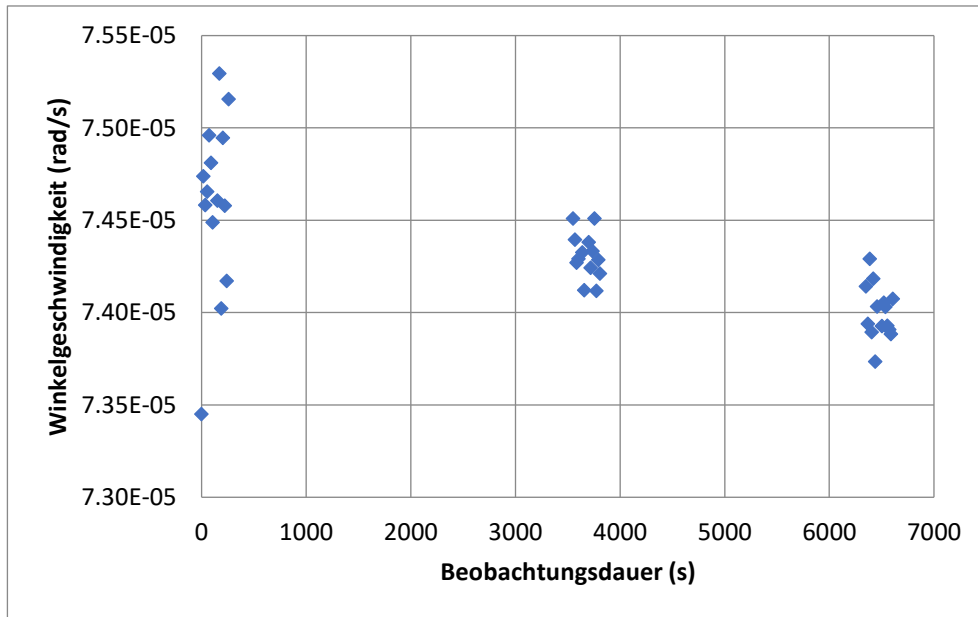


Abbildung 21: Objekt 68081G – Winkelgeschwindigkeit über der Beobachtungsdauer – Tag 3 (Messung vom 16.8.2018). (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

3.4.1.2.3 Vergleich mit den Ergebnissen von Celmech und Erklärung für mögliche Abweichungen

Bei den analytischen Berechnungen bin ich davon ausgegangen, dass sich die beobachteten Objekte auf einer perfekt geostationären Bahn bewegen. Schon während der Auswertung der Graphen waren jedoch immer wieder Abweichungen dieser Hypothese sichtbar geworden. Dies wird durch die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse der Celmech Software bestätigt.

Tabelle 3: Objekt 68081G – Ergebnisse der Celmech Software (nur teilweise wiedergegeben)

Grosse Halbachse:	41953194,877 m +/- 1,015 m
Exzentrizität:	0,0125368047 +/- 0,0000013483
Inklination:	5,2071644° +/- 0,000018420°
Länge des aufsteigenden Knotens:	-48,4113461° +/- 0,000307060°
Argument der Periapsis:	-27,8883059° +/- 0,001954748°

Bei einem perfekt geostationären Orbit hätten die Inklination und die Exzentrizität den Wert Null. Die Länge des aufsteigenden Knotens und das Argument der Periapsis können nicht bestimmt werden, da die Knotenpunkte, die den Durchgang der Äquatorebene markieren, bei einem Objekt in der Äquatorebene per Definition nicht existieren.

Die Abweichungen von einer perfekt geostationären Bahn werden sowohl in den oben gezeigten Graphen der Deklination und Winkelgeschwindigkeit, wie auch in den Resultaten der Celmech Software sichtbar. Der einzige Graph, der die These einer perfekt geostationären Bahn nicht widerlegen kann, ist der der Rektaszension. Dies kann jedoch wie erwähnt darauf zurückzuführen sein, dass das Objekt

nur über wenige Stunden und nicht beispielsweise über einen ganzen Umlauf beobachtet wurde und somit die Abweichungen nicht sichtbar wurden.

Eine der Ursachen für die Unterschiede zu der ursprünglich vermuteten Kreisbahn ist die Abweichung der Erde von einer perfekten Kugel, wodurch auch deren Gravitationsfeld nicht kugelsymmetrisch ist (WIKIPEDIA, 2018, Geosynchrone Umlaufbahn). Zudem wird das beobachtete Weltraumschrott-Objekt nicht nur von der Erde angezogen, sondern auch durch das Gravitationsfeld der Sonne, des Mondes und sogar von anderen Satelliten beeinflusst. Auch der immerwährende Sonnenwind, ein Strom geladener Teilchen, welchen die Sonne in alle Richtungen abgibt, kann die Bahn eines Objekts im Weltraum verändern (WIKIPEDIA, 2018, Sonnenwind).

3.4.1.2.4 Ermittlung der Inklination

Wie wir gesehen haben, muss die anfängliche These eines perfekt geostationären Orbits wegen der beobachteten Bahnabweichungen verworfen werden. Als erste Annäherung an den wahren Orbit des Objekts wird daher mit dem in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Verfahren die Inklination berechnet.

Tabelle 4: Objekt 68081G – Inklination der Bahnebene.

Punkte in der Bahnebene des Objekts 68081G		
	Datenpunkt 38	Datenpunkt 91
Polarwinkel	$\theta' = 95.67^\circ$	$\theta' = 91.26^\circ$
Azimutwinkel	$\varphi' = 328.13^\circ$	$\varphi' = 36.08^\circ$
Punkte in der Äquatorebene		
	Punkt 1	Punkt 2
Polarwinkel	$\theta' = 90^\circ$	$\theta' = 90^\circ$
Azimutwinkel	$\varphi' = 0^\circ$	$\varphi' = 90^\circ$
Winkel zwischen den Normalenvektoren beider Ebenen		
Inklination	$i = 5.75^\circ$	

Der vollständige Rechenweg mit allen Zwischenschritten ist in Anhang C ersichtlich. Der so ermittelte Wert der Inklination stimmt ziemlich genau mit dem durch die Celmech Software errechneten Wert von 5.21° überein (siehe Tabelle 3).

3.4.1.2.5 Vergleich mit früheren Daten

Wie schon in Kapitel 3.3.4 erwähnt habe ich versucht, mit Daten von Space-Track.org herauszufinden, ob und wie sich die Bahn des Objekts innerhalb der letzten 20 Jahre verändert hat. Die COSPAR-Bezeichnung 68081G entspricht dabei der NORAD-Katalog-Nr. 25000.

Abbildung 22 zeigt die Veränderung der Inklination. Auffällig ist dabei, dass die Inklination während der vergangenen 20 Jahre stetig abnahm, das heißt, dass sich die Bahnebene der Äquatorebene

annähert. Diese Veränderung könnten auf die in Kapitel 3.4.1.2.3 erwähnten, von Sonne und Mond ausgehenden Störkräfte zurückzuführen sein.

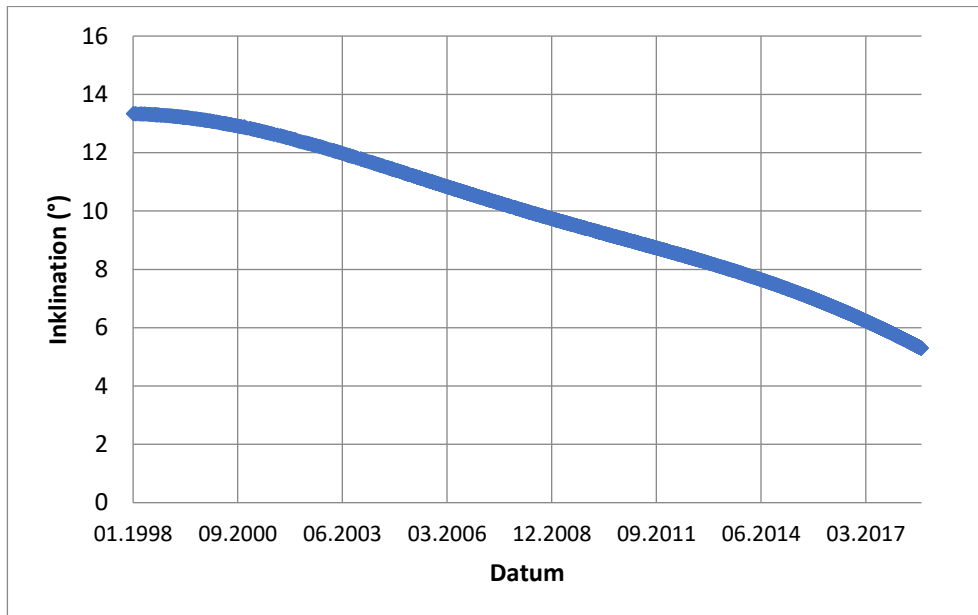


Abbildung 22: Objekt 68081G – Veränderung der Inklination während der letzten 20 Jahre.
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Auch die Länge des aufsteigenden Knotens, der die Verdrehung der Bahnebene zur Äquatorebene relativ zur Polachse beschreibt, erfährt eine annähernd lineare Veränderung, wie in Abbildung 23 zu sehen ist. Der Sprung der Werte von 0° zu 360° am Beginn der Beobachtungsperiode lässt sich wiederum durch den Nulldurchgang des Winkels erklären, das heisst den Wechsel von „positiven“ zu „negativen“ Werten des Winkels. Bei einer anderen Definition des Nullpunktes würde dieser Effekt nicht auftreten.

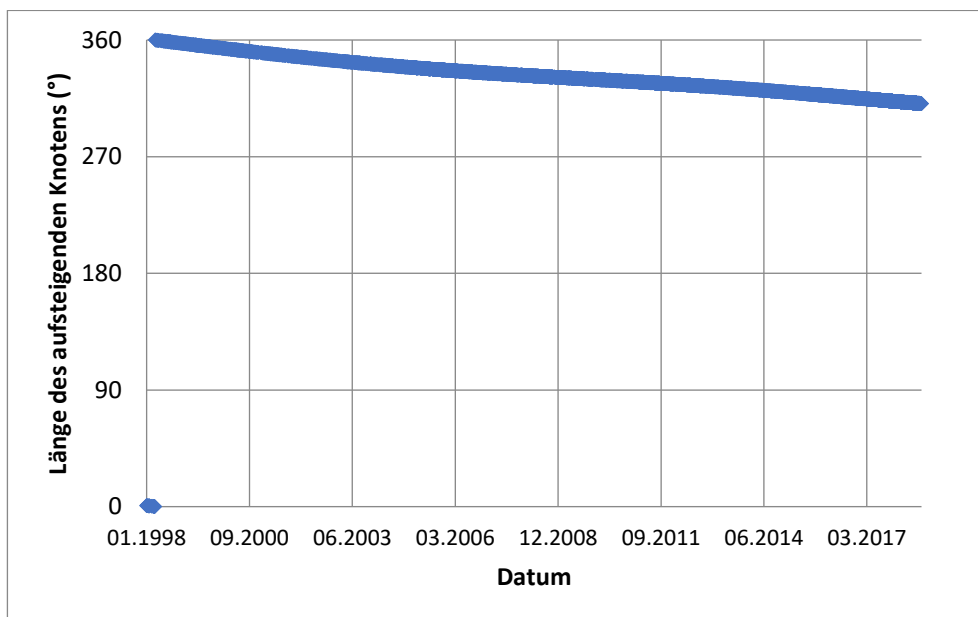


Abbildung 23: Objekt 68081G – Veränderung der Länge des aufsteigenden Knotens während der letzten 20 Jahre.
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Zudem verändert sich auch die numerische Exzentrizität, ein Mass für das Verhältnis der zwei Halbachsen der Bahnellipse, im Lauf des Beobachtungszeitraums von 20 Jahren. Wie aus Abbildung 24 ersichtlich, überlagern sich zwei Schwankungen: Die eine Schwankung hat die Form einer Sinuswelle, die Schwingungsperiode beträgt 1 Jahr. Es könnte sich hier also um einen Effekt handeln, der mit dem Umlauf der Erde um die Sonne zu tun hat. Diesem Effekt überlagert ist eine zweite Schwankung mit deutlich niedrigerer Frequenz. Die Ausreisser zwischen 2001 und 2002 und um 2009 sind wahrscheinlich auf Fehlmessungen zurückzuführen

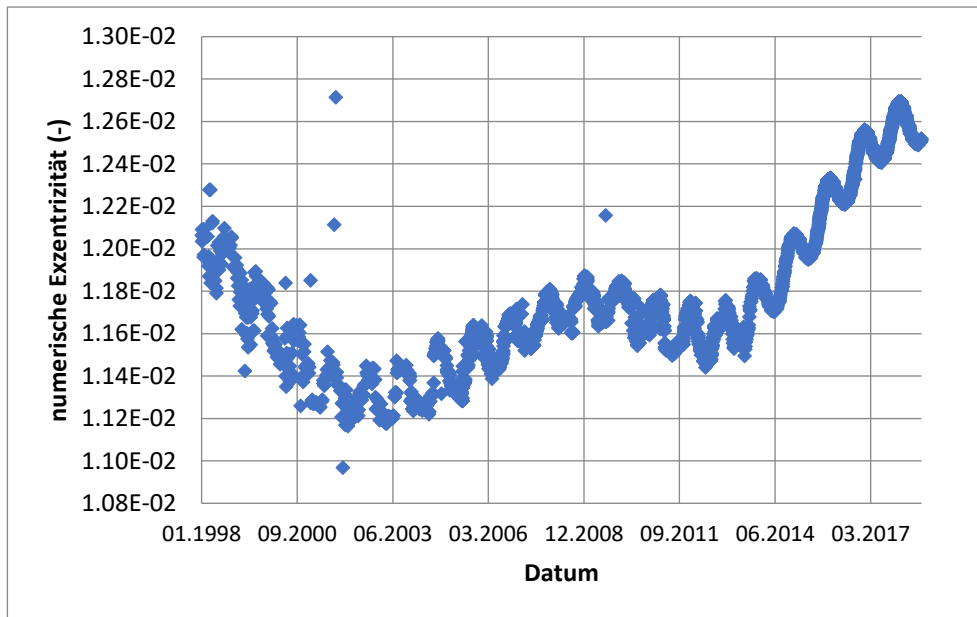


Abbildung 24: Objekt 68081G – Veränderung der numerischen Exzentrizität während der letzten 20 Jahre. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

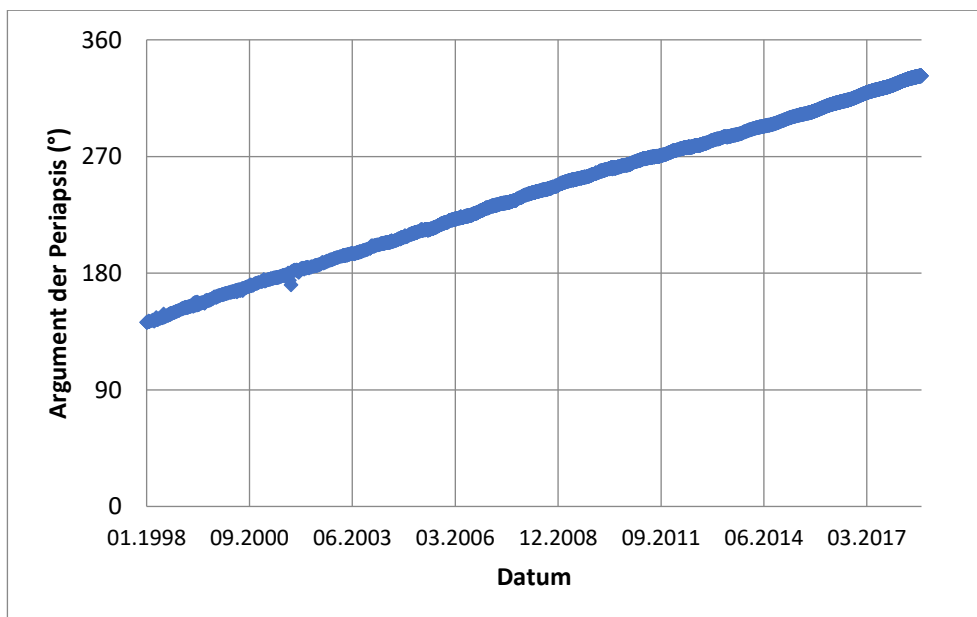


Abbildung 25: Objekt 68081G – Veränderung des Arguments der Periapsis während der letzten 20 Jahre. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Das Argument der Periapsis in Abbildung 25 zeigt einen linearen Verlauf, wobei sich die Bahnellipse innerhalb der Bahnebene um mehr als 190° während 20 Jahren verdreht. Auch diese Änderungen könnten auf die erwähnten Störkräfte zurückzuführen sein.

3.4.2 Russische Raketenstufe (Objekt 76092F)

3.4.2.1 Beschreibung des Objekts

Das Objekt mit der COSPAR-Bezeichnung 76092F ist die Oberstufe einer Proton-K Trägerrakete. Die beobachtete vierte Stufe ist ein sogenannter DM Block, der es der USSR zum ersten Mal erlaubte, einen geostationären Orbit zu erreichen. Dieser Oberstufentyp wurde zwischen 1974 und 1990 für insgesamt 66 Flüge benutzt (WIKIPEDIA, 2018, Proton-K; WIKIPEDIA, 2018, Blok D; Russian Space Web, 2016, Block D upper stage; Gunter's Space Page, 2017, Proton-K Blok-DM).

Aus der COSPAR-Bezeichnung ist abzulesen, dass das Objekt 1976 gestartet wurde und den 92. Raketenstart dieses Jahres darstellte (WIKIPEDIA, 2018, COSPAR-Bezeichnung).

3.4.2.2 Resultate und Interpretation der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse für die beobachtete russischen Raketenstufe stimmt zu einem grossen Teil mit den für das erste Objekt gemachten Schlussfolgerungen überein (siehe Kapitel 3.4.1.2). Daher wird in diesem Kapitel wiederum nur auf Unterschiede hingewiesen.

In Abbildung 26 ist erkennbar, dass dieses Objekt im Gegensatz zum ersten nur während zwei statt drei Tagen beobachtet wurde.

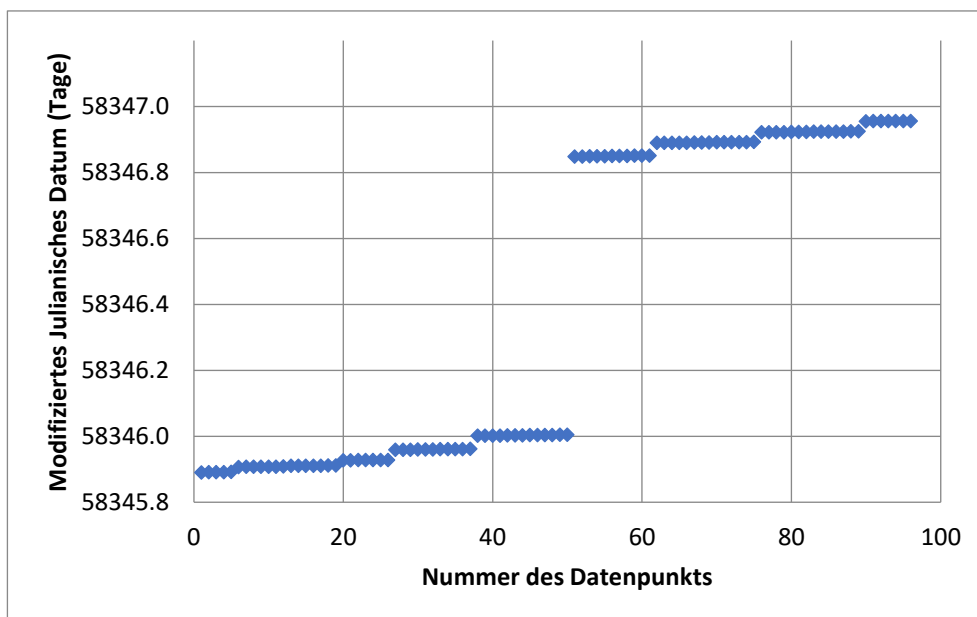


Abbildung 26: Objekt 76092F – Beobachtungszeit über der Nummer des Datenpunkts.
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Eine Tabelle aller Messwerte (Modifiziertes Julianisches Datum, Rektaszension, Deklination) und der daraus berechneten Winkelgeschwindigkeiten ist im Anhang B zu finden.

3.4.2.2.1 Graphische Darstellung der Messwerte für Rektaszension und Deklination

Als repräsentatives Beispiel zeigt Abbildung 27 den Verlauf der Rektaszension als Funktion der Beobachtungsdauer am ersten Tag.

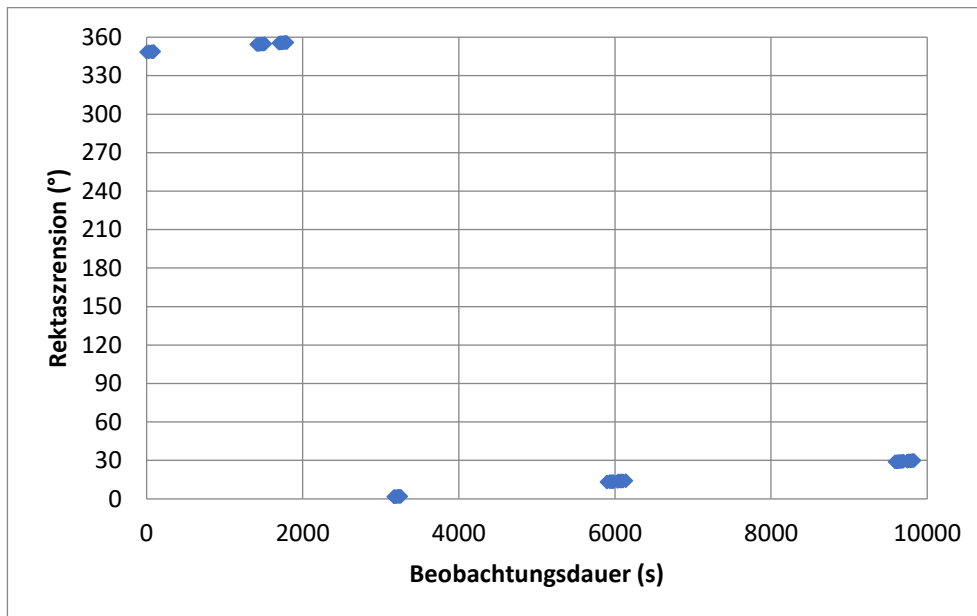


Abbildung 27: Objekt 76092F – Rektaszension über der Beobachtungsdauer – Tag 1 (Messung vom 15.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Wie beim ersten Objekt steigt die Rektaszension vor und nach dem Sprung, der durch den Übergang der Werte von 360° zu 0° entsteht, in erster Näherung linear an.

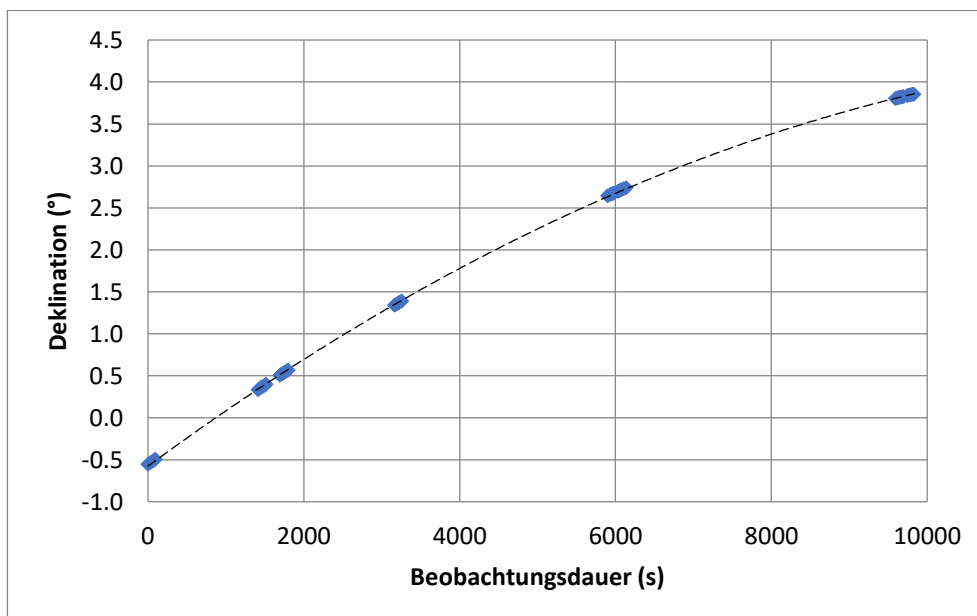


Abbildung 28: Objekt 76092F – Deklination über der Beobachtungsdauer – Tag 1 (Messung vom 15.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Die Deklination in Abbildung 28 ist wie beim ersten Objekt zuerst negativ, wechselt jedoch im Verlauf zu positiven Werten. Somit befindet sich dieses Objekt teils unterhalb und teils oberhalb der Äquator-ebene. Wiederum lässt sich daraus folgern, dass sich das Objekt nicht auf einer perfekt geostationären Bahn bewegt.

3.4.2.2.2 Auswertung von Winkelgeschwindigkeit, Bahnhöhe und Bahngeschwindigkeit

Wie beim ersten Objekt lassen sich unter der Annahme einer Kreisbahn aus dem Mittelwert der Winkelgeschwindigkeiten durch Anwendung der im Kapitel 3.3.2 dargestellten Formeln der Bahnradius und die Bahngeschwindigkeit bestimmen:

Tabelle 5: Objekt 76092F – Bahnhöhe und -geschwindigkeit unter Annahme einer Kreisbahn.

Anzahl der Datenpunkte:	95
Mittelwert der Winkelgeschwindigkeit:	7,38658 10^{-5} rad/s
Minimum:	7,29042 10^{-5} rad/s
Maximum:	7,44492 10^{-5} rad/s
Standardabweichung:	3,61821 10^{-7} rad/s
Berechneter Bahnradius (gemessen ab dem Erdmittelpunkt):	41'803,38 km
Berechnete Bahnhöhe (gemessen ab der Erdoberfläche):	35'425,24 km
Berechnete Bahngeschwindigkeit:	3'087,84 m/s

Vergleicht man die berechneten Ergebnisse mit den theoretischen Daten der geostationären Umlaufbahn (siehe Kapitel 2.2.3), ergeben sich wiederum kleine Unterschiede:

Tabelle 6: Objekt 76092F – Vergleich von Bahnhöhe und -geschwindigkeit mit der theoretischen GEO Bahn.

	Berechnete Daten für das Objekt 76092F	Theoretische Daten für die GEO-Bahn	Abweichung	
Bahnradius:	41'803,38 km	42'240,54 km	-437,16 km	-1.0%
Bahnhöhe:	35'425,24 km	35'862,40 km	-437,16 km	-1.2%
Bahngeschwindigkeit:	3'087,84 m/s	3'071,82 m/s	+16,02 m/s	+0.5%

Der berechnete Bahnradius liegt um circa 437 km unterhalb der geostationären Bahn und somit im Bereich des Friedhoforbits. Da sich die Bahn somit unterhalb des theoretische GEO Orbits befindet, muss sich das Objekt schneller bewegen, um nicht auf die Erde zurückzufallen.

Wie aus Abbildung 29 und Abbildung 30 ersichtlich, ist die aus den Änderungsraten der Rektaszension und Deklination berechnete momentane Winkelgeschwindigkeit nicht konstant. Wegen des 2. Kepler-schen Gesetzes lässt sich daraus schliessen, dass sich das Objekt nicht auf einer Kreisbahn, sondern auf einer elliptischen Bahn bewegt. Im Gegensatz zur amerikanischen Raketenstufe ist jedoch während

der Beobachtungszeit ein Aufwärtstrend zu erkennen. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Beobachtung des Objekts auf einem anderen Abschnitt der Bahnellipse erfolgte.

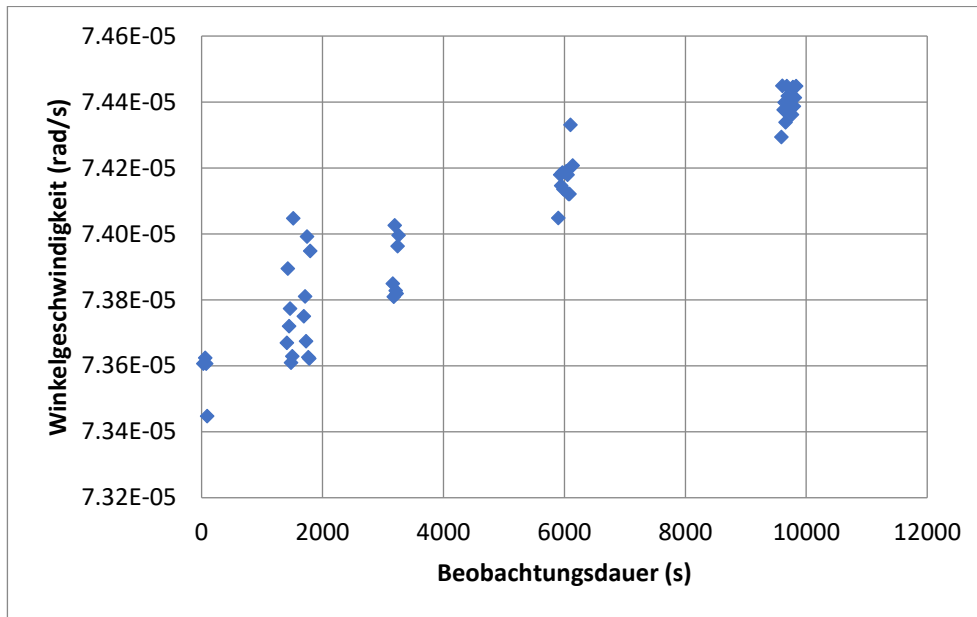


Abbildung 29: Objekt 76092F – Winkelgeschwindigkeit über der Beobachtungsdauer – Tag 1 (Messung vom 15.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

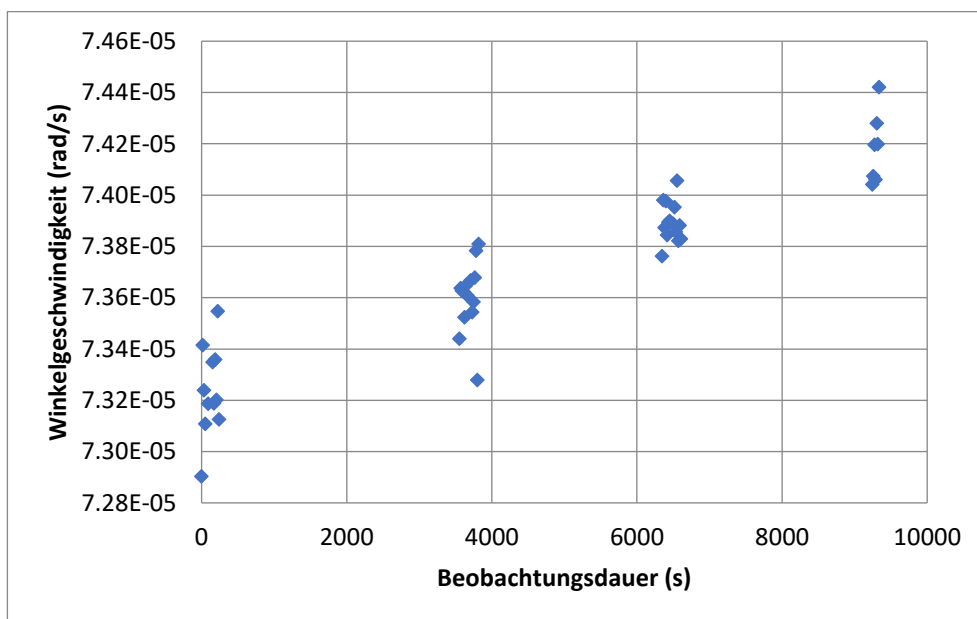


Abbildung 30: Objekt 76092F – Winkelgeschwindigkeit über der Beobachtungsdauer – Tag 2 (Messung vom 16.8.2018).
(Abbildung: Aline Usinger, 2018).

3.4.2.2.3 Vergleich mit den Ergebnissen von Celmech

Auch bei diesem Objekt sind während der Auswertung der Graphen Abweichungen sichtbar geworden, die gegen die anfängliche Annahme einer perfekt geostationären Bahn sprechen. Zudem bestätigen die Ergebnisse der Celmech Software diese Unterschiede, wie aus Tabelle 7 sichtbar wird. Die

Ungenauigkeiten sind dabei wiederum sehr klein, weswegen davon ausgegangen werden kann, dass die erhaltenen Ergebnisse nicht auf Grund von Fehlmessungen zustande gekommen sind.

Tabelle 7: Objekt 76092F – Ergebnisse der Celmech Software (nur teilweise wiedergegeben)

Grosse Halbachse	42156190,900 m +/- 2,285 m
Exzentrizität	0,0015077035 +/- 0,0000031940
Inklination	10,2299340° +/- 0,000040192°
Länge des aufsteigenden Knotens	-50,7836550° +/- 0,000193267°
Argument der Periapsis	104,0707249° +/- 0,062531605°

3.4.2.2.4 Ermittlung der Inklination

Wie für das erste Objekt wird die Inklination als erste Annäherung an den wahren Wert mit dem in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Verfahren berechnet.

Tabelle 8: Objekt 76092F – Inklination der Bahnebene.

Punkte in der Bahnebene des Objekts 76092F		
	Datenpunkt 51	Datenpunkt 26
Polarwinkel	$\theta' = 92.93^\circ$	$\theta' = 88.61^\circ$
Azimutwinkel	$\varphi' = 334.28^\circ$	$\varphi' = 1.98^\circ$
Punkte in der Äquatorebene		
	Punkt 1	Punkt 2
Polarwinkel	$\theta' = 90^\circ$	$\theta' = 90^\circ$
Azimutwinkel	$\varphi' = 0^\circ$	$\varphi' = 90^\circ$
Winkel zwischen den Normalenvektoren beider Ebenen		
Inklination	$i = 8.99^\circ$	

Der vollständige Rechenweg mit allen Zwischenschritten ist in Anhang D ersichtlich. Der so ermittelte Wert der Inklination stimmt annähernd mit dem durch die Celmech Software errechneten Wert von 10.23° überein (siehe Tabelle 7). Die Abweichungen können daher kommen, dass bei der manuellen Berechnung der Inklination nur wenige Beobachtungsdaten berücksichtigt worden sind.

3.4.2.2.5 Vergleich mit früheren Daten

Auch für die russische Raketenstufe habe ich versucht, mit Daten von Space-Track.org herauszufinden, ob und wie sich die Bahn des Objekts im Zeitraum von 1.1.1998 bis zum 16.8.2018 verändert hat. Die COSPAR-Bezeichnung 76092F entspricht dabei der NORAD-Katalog-Nr. 17872.

Die Interpretation der Ergebnisse für die beobachtete russischen Raketenstufe stimmt zu einem grossen Teil mit den für das erste Objekt gemachten Schlussfolgerungen überein (siehe Kapitel 3.4.1.2). Daher wird in diesem Kapitel nur auf Unterschiede hingewiesen.

Bei der amerikanischen Raketenstufe nahm während der vergangenen 20 Jahre die Inklination der Bahnebene stetig ab. Wie aus Abbildung 31 ersichtlich, nimmt die Inklination des russischen Objekts jedoch zunächst leicht zu und erst dann mit zunehmender Geschwindigkeit wieder ab.

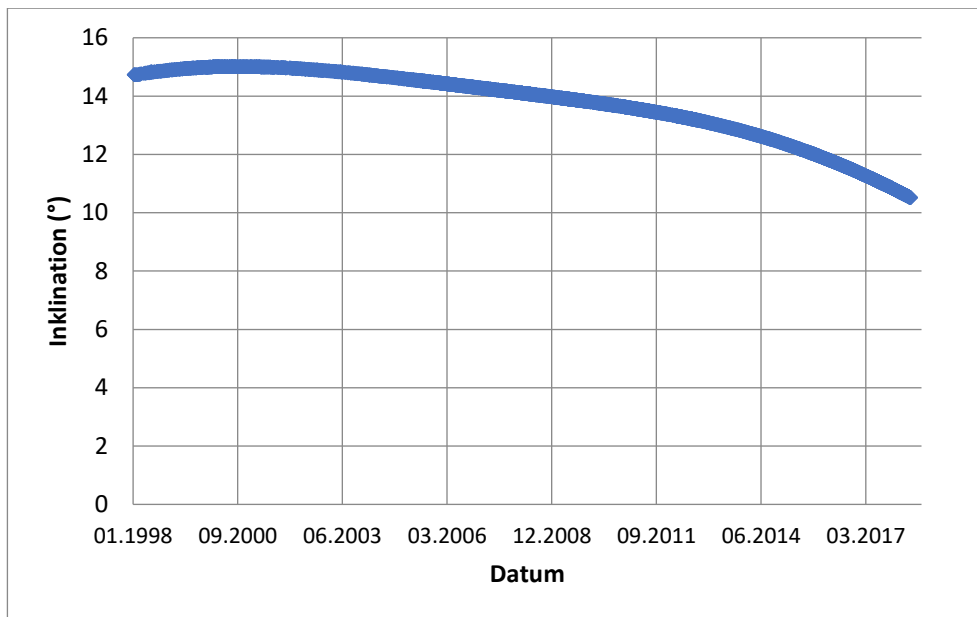


Abbildung 31: Objekt 76092F – Veränderung der Inklination während der letzten 20 Jahre. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Die Länge des aufsteigenden Knotens verändert sich wie beim ersten Objekt annähernd linear, siehe Abbildung 32.

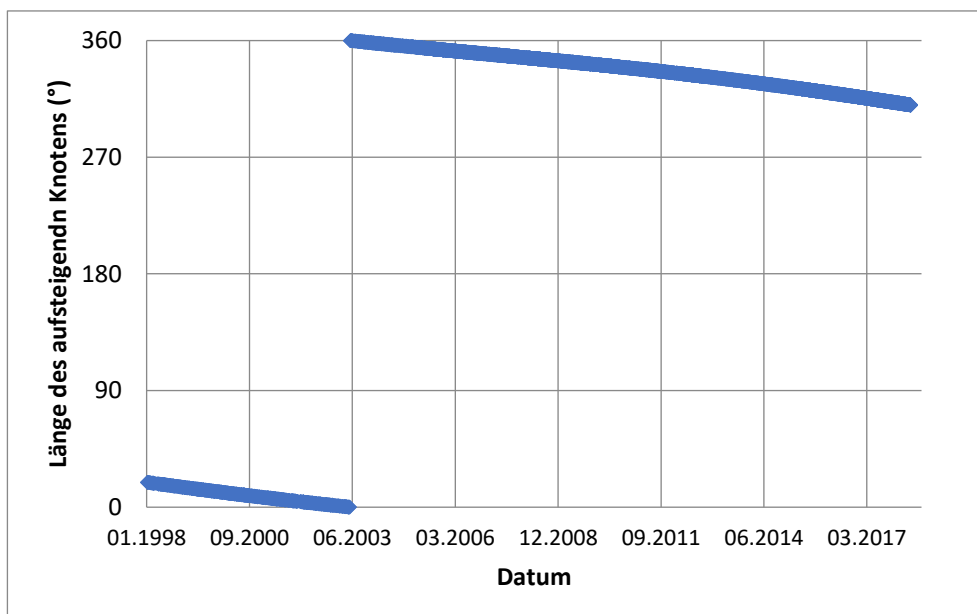


Abbildung 32: Objekt 76092F – Veränderung der Länge des aufsteigenden Knotens während der letzten 20 Jahre. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Die Entwicklung der numerischen Exzentrizität während der vergangenen 20 Jahre ist in Abbildung 33 dargestellt:

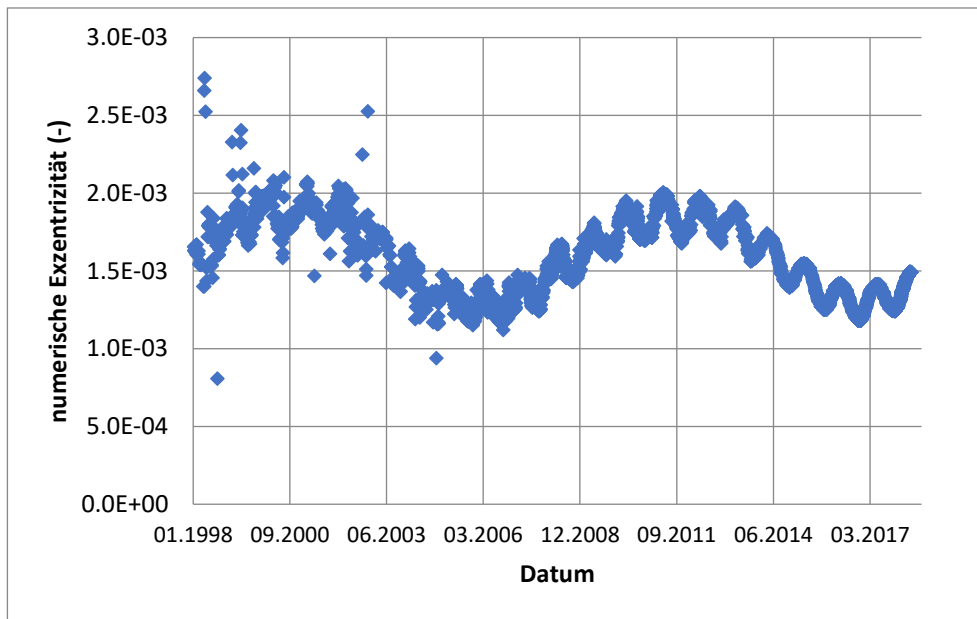


Abbildung 33: Objekt 76092F – Veränderung der numerischen Exzentrizität während der letzten 20 Jahre. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Ähnlich wie beim ersten Objekt überlagern sich zwei Schwankungen, nämlich eine Sinuswelle mit der Schwingungsperiode 1 Jahr und eine zweite Schwankung mit deutlich niedrigerer Frequenz. Die Periode der zweiten Schwankung liegt bei ungefähr 11 Jahren, was der durchschnittlichen Dauer der Sonnenfleckenzyklen entspricht (WIKIPEDIA, 2018, Sonnenfleck). Es liegt daher die Vermutung nahe, dass die Ursache dieser zweiten Schwankung in der Änderung der Sonnenaktivität liegt. Bei genauerer Betrachtung hingegen zeigt sich, dass das Maximum des 24. Sonnenfleckenzyklus nicht wie nach der Regel erwartet im Jahr 2011, sondern im Jahr 2014 liegt (siehe Abbildung 34). Die Schwingungsdauern der beiden Phänomene passen also nicht zueinander. Damit bleibt die Ursache der niedrigfrequenten Schwankung der numerischen Exzentrizität unklar.

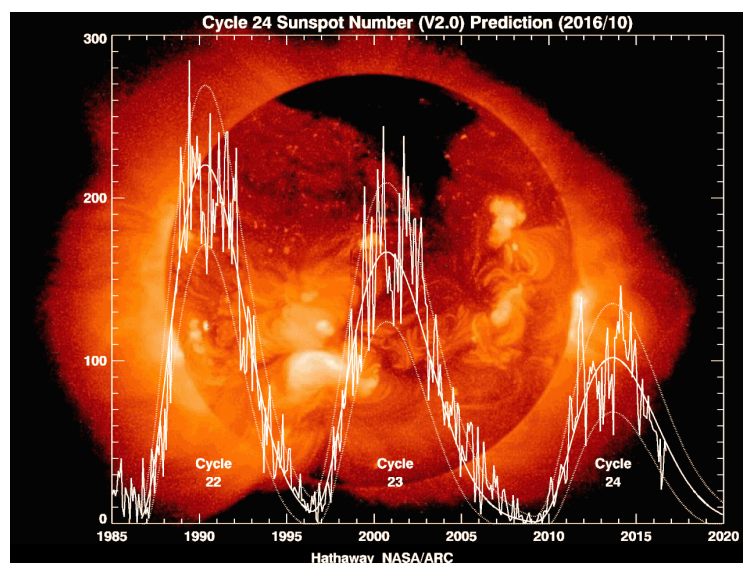


Abbildung 34: Sonnenfleckenzyklen 22 bis 24. (Abbildung: WIKIPEDIA, 2018, Sonnenfleck).

Das Argument der Periapsis (Abbildung 35) zeigt im Gegensatz zum ersten Objekt keinen annähernd linearen Verlauf, sondern ist mit deutlich grösseren Störungen überlagert. Während 20 Jahren verdreht sich die Bahnellipse innerhalb der Bahnebene um mehr als 140° . Der Sprung ist wiederum auf den Nulldurchlauf des Winkels zurückzuführen.

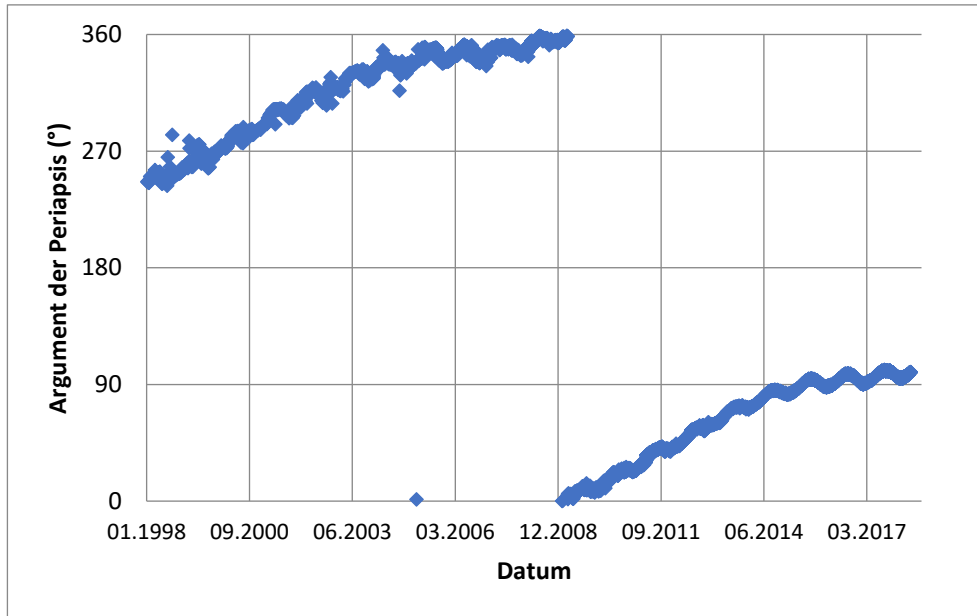


Abbildung 35: Objekt 76092F – Veränderung des Arguments der Periapsis während der letzten 20 Jahre. (Abbildung: Aline Usinger, 2018).

Zwischenfazit:

Die Bahnen von Weltraumschrott-Objekten im geostationären Orbit können sich, obwohl sie nicht mehr von der abbremsenden Wirkung der Atmosphäre beeinflusst werden, über die Jahre aufgrund von Einflüssen wie zum Beispiel Sonnenwind und Unregelmässigkeiten im Gravitationsfeld signifikant verändern. Es ist daher wichtig, die Bahnen regelmässig zu verfolgen, um Änderungen rechtzeitig zu erkennen, damit drohende Kollisionen mit noch aktiven Objekten in ähnlichen Orbits verhindert werden können.

3.5 Aufgetretene Probleme

Beobachtungen

Leider sind Beobachtungen mit astrometrischen Teleskopen sehr wetterabhängig. So konnte ich beispielsweise in der ersten Beobachtungsnacht erst spät mit den Messungen beginnen.

Berechnungen

Eine grosse Herausforderung bei den Berechnungen war sicherlich, dass wir deren Grundlagen nur zum Teil in der Schule behandelt hatten und ich mir daher den Lösungsweg mit Hilfe von Büchern und des Internets erarbeitet habe.

Zudem hatte ich anfänglich Schwierigkeiten, beispielsweise das TLE- oder COSPAR-Format in eine Excel Tabelle zu übertragen, und die für mich sehr ungewohnten Einheiten umzurechnen. Trotz des Besuchs des ECDL Computer-Kurses in der Schule habe ich viele der Formeln, die ich brauchte, um das gewünschte Resultat zu erhalten, in der Excel Online-Hilfe nachgeschaut und mich tiefer in diese Software eingearbeitet.

4 Zusammenfassung

Es ist mit den heute verfügbaren technischen Mitteln nicht möglich, alle existierenden Weltraumobjekte zuverlässig zu erfassen. Durch ausrangierte Raumflugkörper sowie explodierende, beziehungsweise kollidierende Satelliten und Raketenstufen entsteht ständig neuer Schrott. Der Trend zu immer zahlreicheren, kleiner werdenden Satelliten und die von Jahr zu Jahr steigende Zahl von Raketenstarts haben dazu beigetragen, dass sich die Zunahme der Schrottpopulation in den letzten Jahren deutlich beschleunigt hat. Vor allem in niedrigen Erdorbits könnte es zu einer Kollisionskaskade kommen, dem so genannten Kessler Syndrom, was eine enorme Einschränkung der Raumfahrt und der Nutzung von erdbasierten Teleskopen darstellen würde. Zudem besteht auch ein (momentan) geringes Risiko für Menschen, von Weltraumschrott getroffen zu werden, denn es gibt immer wieder Objekte, die den Wiedereintritt in die Atmosphäre überleben.

Wie die Auswertung der Messdaten für die zwei am Observatorium Zimmerwald beobachteten Weltraumschrott-Objekte zeigt, lässt sich die zu Beginn der Arbeit aufgestellte Hypothese, dass sich diese Objekte auf perfekten Kreisbahnen bewegen, nicht aufrechterhalten. Stattdessen bewegen sie sich auf leicht elliptischen Bahnen knapp unterhalb des geostationären Orbits. Der Vergleich mit historischen Daten macht deutlich, dass die Bahnen beider Objekte während der vergangenen 20 Jahre nicht konstant geblieben sind. Obwohl sie aufgrund ihrer Bahnhöhe nicht mehr von der bremsenden Wirkung der Atmosphäre beeinflusst werden, haben sich ihre Bahnparameter innerhalb weniger Jahre aufgrund von Einflüssen wie die Unregelmässigkeiten im Gravitationsfeld der Erde, der Anziehungskraft des Mondes und den Sonnenwind signifikant verändert. Dies zeigt, wie wichtig es ist, die Bahnen aller Weltraumobjekte kontinuierlich zu verfolgen. Nur so können Änderungen rechtzeitig erkannt und drohende Kollisionen mit anderen Objekten - wenn überhaupt - verhindert werden. Jedoch ist es, wie ich im Verlauf meiner Arbeit selber bemerkt habe, schwierig, für die vielen Schrottteile einen bis auf wenige Meter genauen Orbit festzulegen, was für die effektive Einschätzung einer drohenden Gefahr nötig ist. Selbst für die beiden beobachteten geostationären Objekte konnte ich wegen der erwähnten Störungskräfte, die deren Bahnen beeinflussen, lediglich eine Annäherung an die tatsächliche Bahnhöhe und Inklination berechnen.

Ich hoffe, dass ich mit meiner Arbeit darauf aufmerksam machen konnte, dass Müll nicht nur auf der Erde ein grosses Problem darstellt, sondern vermehrt auch im Weltraum. Deshalb ist es wichtig, sich der von der „Blechlawine“ am Himmel ausgehenden Gefahren bewusst zu werden und mit Hochdruck nach effektiven Gegenmassnahmen zu suchen, damit das Weltall auch für unsere Nachwelt zugänglich und nutzbar sein kann.

Danksagung

Viele Personen haben zum Gelingen meiner Maturaarbeit beigetragen. Deshalb werden sie chronologisch aufgeführt. Ich bedanke mich herzlich bei:

- Matias Meier Trüllinger, Physik- und Astronomielehrer an der Kantonsschule Rychenberg, Winterthur, als meinem Betreuer, der mich unermüdlich von Anfang an unterstützt hat,
- Markus Griesser, Leiter der Sternwarte Eschenberg, der mir, obwohl Weltraumschrott seine Beobachtungen stört, wie immer gerne weitergeholfen und mir den Kontakt zur Universität Bern vermittelt hat,
- Professor Dr. Thomas Schildknecht, Vizedirektor des Astronomischen Institutes der Universität Bern, Leiter Optische Astronomie, Direktor Observatorium Zimmerwald, der mir trotz Zeitknappheit geduldigst telefonisch und vor Ort in Bern Fragen beantwortet, mich mit wertvollem Material versorgt und mir den Aufenthalt am Observatorium Zimmerwald ermöglicht hat,
- Dr. Emiliano Cordelli, Julian Rodriguez, Benedikt Reihls als Wissenschaftler des Astronomischen Institutes Bern, die mir bei meinem Aufenthalt in Bern ebenfalls mit grösster Geduld alles erklärt und gezeigt sowie mit Material unterstützt haben,
- meiner Familie, die mir bei der kritischen Durchsicht des Manuskripts tatkräftig zur Seite gestanden hat.

Literaturverzeichnis

Bücher

BONNAL CHRISTOPHE/MCKNIGHT DARREN S. (Hrsg.), IAA Situation Report on Space Debris – 2016, Paris 2017 (zit. IAA REPORT, 2016).

GREHN JOACHIM/KRAUSE JOACHIM (Hrsg.), Metzler Physik SII, Braunschweig 2007 (zit. METZLER, 2007).

KEITH JOHNSON/SIMMONE HEWETT/SUE HOLT/JOHN MILLER, Advanced Physics for you, Oxford, 2015 (zit. PHYSICS FOR YOU, 2015).

SCHILDKNECHT THOMAS, Impact of Human Activity on the Near-Earth Space Environment, in: Nicollier Claude/Gass Volker (Hrsg.), Our Space Environment, Lausanne 2015, S. 113-135 (zit. SCHILDKNECHT, 2015).

Artikel in Zeitschriften

SCHILDKNECHT THOMAS, Optical surveys for space debris, in: The Astronomy and Astrophysics Review (2007) Volume 14, Issue 1, S. 41-111, URL: <https://doi.org/10.1007/s00159-006-0003-9> (zit. SCHILDKNECHT, 2007).

Internetquellen

AIUB (Astronomisches Institut Universität Bern): Seite „Teleskope - Zimlat“. URL: http://www.aiub.unibe.ch/forschung/observatorium_zimmerwald/teleskope/index_ger.html (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

FAZ (Frankfurter Allgemeine Zeitung): Seite „Tiangong 1 stürzt über Südpazifik ab“. Bearbeitungsstand: 2. April 2018, 4:17 UTC. URL: <http://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/tiangong-1-stuerzt-ueber-suedpazifik-ab-15522437.html> (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt): Seite „Weltraummüll-Forschung“. URL: https://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2265/3376_read-5091/ (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

ESA (Europäische Weltraumagentur): Seite „Clean Space“. Bearbeitungsstand: 12. April 2016. URL: https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Clean_Space/e.Deorbit (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

ESA (Europäische Weltraumagentur): Seite „Space Debris“. Bearbeitungsstand: 21. Februar 2018. URL: https://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Debris/About_space_debris (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

GitHub: Seite „Celmech – a collection of analytical and semianalytical tools for celestial mechanics, developed by Sam Hadden and Dan Tamayo“. URL: <https://github.com/shadden/celmech> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Gunter's Space Page: Seite „Proton-K Blok-DM“. Bearbeitungsstand: 12. Dezember 2017. URL: https://space.skyrocket.de/doc_lau_det/proton-k_blok-dm.htm (Abgerufen: 3. November 2018).

Mathcentre: Seite „The scalar product“. Bearbeitungsstand: 2009. URL: <http://mathcentre.ac.uk/resources/uploaded/mc-ty-scalarprod-2009-1.pdf> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Mathcentre: Seite „The vector product“. Bearbeitungsstand: 2009. URL: <http://mathcentre.ac.uk/resources/uploaded/mc-ty-vectorprod-2009-1.pdf> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Russian Space Web: Seite „Block D upper stage“. Bearbeitungsstand: 2. Januar 2016. URL: http://www.russianspaceweb.com/n1_d.html (Abgerufen: 3. November 2018).

Spektrum – Lexikon der Geographie: Seite „geostationärer Satellit“. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/geostationaerer-satellit/2985> (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

Spektrum – Wissen: Seite „Astronomie für Einsteiger“. URL: <https://www.spektrum.de/wissen/10-fakten-die-sie-ueber-teleskope-wissen-muessen/1224721> (Abgerufen: 3. November 2018).

TLE-Katalog: Seite: „Space-Track.org“. URL: <https://www.space-track.org/> (Abgerufen: 27. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Apsis_(Astronomie)“. Bearbeitungsstand: 3. Oktober 2018, 14:54 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Apsis_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Apsis_(Astronomie)) (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Äquator#Himmelsäquator“. Bearbeitungsstand: 23. September 2018, 12:16 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Äquator#Himmelsäquator> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Bahnelement“. Bearbeitungsstand: 24. November 2017, 10:15 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnelement> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Blok D“. Bearbeitungsstand: 14. August 2017, 17:19 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Blok_D (Abgerufen: 3. November 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Committee_on_Space_Research“. Bearbeitungsstand: 28. April 2018, 21:52 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Committee_on_Space_Research (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „COSPAR-Bezeichnung“. Bearbeitungsstand: 1. Februar 2017, 14:13 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/COSPAR-Bezeichnung> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Deklination_(Astronomie)“. Bearbeitungsstand: 8. Oktober 2018, 00:15 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Deklination_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Deklination_(Astronomie)) (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Ekliptik“. Bearbeitungsstand: 28. Oktober 2018, 10:53 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Ekliptik> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Erdmasse“. Bearbeitungsstand: 14. Oktober 2018, 20:32 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdmasse> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Erdnähe“. Bearbeitungsstand: 12. August 2018, 10:43 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdnähe> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Erdradius“. Bearbeitungsstand: 17. Oktober 2018, 9:37 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erdradius> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Exzentrizität_(Astronomie)“. Bearbeitungsstand: 21. September 2018, 23:07 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Exzentrizität_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Exzentrizität_(Astronomie)) (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Fengyun-1C“. Bearbeitungsstand: 27. März 2018, 21:38 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fengyun-1C> (Abgerufen: 2. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Frühlingspunkt“. Bearbeitungsstand: 10. September 2018, 20:21 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Frühlingspunkt> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Geosynchrone Umlaufbahn“. Bearbeitungsstand: 31. August 2018, 9:36 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Geosynchrone_Umlaufbahn (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Gravitation“. Bearbeitungsstand: 2. Oktober 2018, 12:29 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitation> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Halbachsen_der_Ellipse“. Bearbeitungsstand: 20. Dezember 2017, 22:15 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Halbachsen_der_Ellipse (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Inter-Agency Space Debris Coordination Committee“. Bearbeitungsstand: 27. März 2018, 23:54 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Inter-Agency_Space_Debris_Coordination_Committee (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Julianisches_Datum“. Bearbeitungsstand: 23. Juli 2018, 17:51 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Julianisches_Datum (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Kepler-Gleichung“. Bearbeitungsstand: 24. August 2018, 19:06 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler-Gleichung> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Knoten_(Astronomie)“. Bearbeitungsstand: 14. November 2016, 22:34 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Knoten_\(Astronomie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Knoten_(Astronomie)) (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Kugelkoordinaten“. Bearbeitungsstand: 7. Oktober 2018, 14:20 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kugelkoordinaten> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Länge_des_aufsteigenden_Knotens“. Bearbeitungsstand: 2. November 2018, 00:16 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Länge_des_aufsteigenden_Knotens (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Proton-K“. Bearbeitungsstand: 17. September 2018, 17:03 UTC. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-K> (Abgerufen: 3. November 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Rektaszension“. Bearbeitungsstand: 8. Oktober 2018, 00:16 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Rektaszension> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Satellitenbahnelement#Das_Two_Line_Elements_Format_TLE“. Bearbeitungsstand: 20. September 2018, 20:56 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenbahnelement#Das_Two_Line_Elements_Format_TLE (Abgerufen: 2. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Satellitenkollision am 10. Februar 2009“. Bearbeitungsstand: 28. März 2018, 00:31 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenkollision_am_10._Februar_2009 (Abgerufen: 2. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Satellitenorbit“. Bearbeitungsstand: 24. Juni 2018, 13:42 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenorbit#Low_Earth_Orbit_\(LEO\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenorbit#Low_Earth_Orbit_(LEO)) (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Satellitenorbit“. Bearbeitungsstand: 24. Juni 2018, 13:42 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenorbit#Geo-station%C3%A4rer_Orbit_\(GEO\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Satellitenorbit#Geo-station%C3%A4rer_Orbit_(GEO)) (Abgerufen: 3. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Sonnenfleck“. Bearbeitungsstand: 27. November 2018, 18:28 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfleck> (Abgerufen: 28. November 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Sonnenwind“. Bearbeitungsstand: 23. November 2018, 11:05 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwind> (Abgerufen: 28. November 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Space debris“. Bearbeitungsstand: 18. Oktober 2018, 19:42 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_debris (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Space debris#Threats“. Bearbeitungsstand: 18. Oktober 2018, 19:42 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_debris (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Space weathering“. Bearbeitungsstand: 12. Oktober 2018, 16:21 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_weathering (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Tiangong_1“. Bearbeitungsstand: 20. Oktober 2018, 17:33 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Tiangong_1 (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Titan_(Trägerrakete)“. Bearbeitungsstand: 26. Oktober 2018, 23:04 UTC. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Titan_\(Trägerrakete\)#Titan_IIC_und_IID](https://de.wikipedia.org/wiki/Titan_(Trägerrakete)#Titan_IIC_und_IID) (Abgerufen: 3. November 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Titan_IIC“. Bearbeitungsstand: 25. Oktober 2018, 02:00 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Titan_IIC#General_characteristics (Abgerufen: 3. November 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Transtage“. Bearbeitungsstand: 25. Oktober 2018, 02:23 UTC. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transtage> (Abgerufen: 3. November 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Weltraummüll“. Bearbeitungsstand: 25. Juni 2018, 20:44 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Weltraummüll> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Zentripetalkraft“. Bearbeitungsstand: 16. Mai 2018, 10:15 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zentripetalkraft> (Abgerufen: 21. Oktober 2018).

Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „2009 satellite collision“. Bearbeitungsstand: 22. September 2018, 17:25 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/2009_satellite_collision (Abgerufen: 2. Oktober 2018).

(CLASSIFICATION OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS produced with the DISCOS Database PDF: Ausstellungsdatum: 12. Februar 2012 URL: <http://www.astronomer.ru/data/0128/COGO14.pdf>).

Filme

IMDb Movie Database: Seite: „Gravity (2013)“. URL: <https://www.imdb.com/title/tt1454468/> (Abgerufen: 4. November 2018).

Abbildungsverzeichnis

Titelseite	Flickr: Seite „ESA_events“. Hochgeladen am 2. März 2016. URL: https://www.flickr.com/photos/esa_events/25352404311/in/album-72157664657690549/ (Abgerufen: 3. November 2018).
Abbildung 1, (S. 5)	Abb. 8.1, S. 104, BONNAL CHRISTOPHE/MCKNIGHT DARREN S. (Hrsg.), IAA Situation Report on Space Debris – 2016, Paris 2017.
Abbildung 2, (S. 5)	Abb. 8.2, S. 104, BONNAL CHRISTOPHE/MCKNIGHT DARREN S. (Hrsg.), IAA Situation Report on Space Debris – 2016, Paris 2017.
Abbildung 3, (S. 6)	Abb. 4.11, S. 128, SCHILDKNECHT THOMAS, Impact of Human Activity on the Near-Earth Space Environment, in: Nicollier Claude/Gass Volker (Hrsg.), Our Space Environment, Lausanne 2015.
Abbildung 4, (S. 7)	Abb. 4.12, S. 129, SCHILDKNECHT THOMAS, Impact of Human Activity on the Near-Earth Space Environment, in: Nicollier Claude/Gass Volker (Hrsg.), Our Space Environment, Lausanne 2015.
Abbildung 5, (S. 11)	Abb. 4.13, S. 130, SCHILDKNECHT THOMAS, Impact of Human Activity on the Near-Earth Space Environment, in: Nicollier Claude/Gass Volker (Hrsg.), Our Space Environment, Lausanne 2015.
Abbildung 6, (S. 12)	Flickr: Seite „ESA_events“. Hochgeladen am 12. Dezember 2016. URL: https://www.flickr.com/photos/esa_events/30758768524/in/album-72157664657690549/ (Abgerufen: 3. November 2018).
Abbildung 7, (S. 15)	AIUB (Astronomisches Institut Universität Bern): Seite „Teleskope - Zimlat“. URL: http://www.aiub.unibe.ch/forschung/observatorium_zimmerwald/teleskope/index_ger.html (Abgerufen: 3. Oktober 2018).
Abbildung 8, (S. 16)	Astronomisches Institut der Universität Bern (AIUB), 2018.
Abbildung 9, (S. 17)	Astronomisches Institut der Universität Bern (AIUB), 2018.
Abbildung 10, (S. 18)	Astronomisches Institut der Universität Bern (AIUB), 2018.
Abbildung 11, (S. 21)	Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Bahnelement“. Bearbeitungsstand: 24. November 2017, 10:15 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnelement (Abgerufen: 21. Oktober 2018)
Abbildung 12, (S. 23)	Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Kepler-Gleichung“. Bearbeitungsstand: 24. August 2018, 19:06 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Kepler-Gleichung (Abgerufen: 21. Oktober 2018).
Abbildung 13, (S. 24)	Wikipedia – The free Encyclopedia (2018): Seite „Right ascension“. Bearbeitungsstand: 25. Oktober 2018, 21:08 UTC. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Right_ascension (Abgerufen: 3. November 2018)
Abbildung 14, (S. 25)	Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Zentripetalkraft“. Bearbeitungsstand: 16. Mai 2018, 10:15 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Zentripetalkraft (Abgerufen: 21. Oktober 2018).
Abbildung 15, (S. 29)	Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Kugelkoordinaten“. Bearbeitungsstand: 7. Oktober 2018, 14:20 UTC. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Kugelkoordinaten (Abgerufen: 21. Oktober 2018).
Abbildung 16, (S. 32)	Aline Usinger, 2018.
Abbildung 17, (S. 33)	Aline Usinger, 2018.

- Abbildung 18, (S. 33) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 19, (S. 35) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 20, (S. 35) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 21, (S. 36) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 22, (S. 38) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 23, (S. 38) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 24, (S. 39) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 25, (S. 39) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 26, (S. 40) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 27, (S. 41) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 28, (S. 41) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 29, (S. 43) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 30, (S. 43) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 31, (S. 45) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 32, (S. 45) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 33, (S. 46) Aline Usinger, 2018.
- Abbildung 34, (S. 46) Wikipedia – Die freie Enzyklopädie (2018): Seite „Sonnenfleck“. Bearbeitungsstand: 27. November 2018, 18:28 UTC. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfleck> (Abgerufen: 28. November 2018).
- Abbildung 35, (S. 47) Aline Usinger, 2018.

Abkürzungsverzeichnis

AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern
COSPAR	Committee on Space Research
DEC	Deklination (Declination)
ECDL	European Computer Driving Licence
ESA	Europäische Weltraumagentur (European Space Agency)
FAZ	Frankfurter Allgemeine Zeitung
GEO	Geostationäre Erdumlaufbahn (Geostationary Earth Orbit)
IADC	Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
ISS	Internationale Raumstation (International Space Station)
JD	Julianisches Datum (Julian Date)
LEO	Niedrige Erdumlaufbahn (Low Earth Orbit)
MEO	Mittlere Erdumlaufbahn (Medium Earth Orbit)
MJD	Modifiziertes Julianisches Datum (Modified Julian Date)
MRO	Mission-Related Object
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NORAD	North American Aerospace Defense Command
Nr.	Nummer
PMD	Post Mission Disposal Rule
RA	Rektaszension (Right Ascension)
SSN	US Space Surveillance Network
TLE	Two Line Elements Format
USA	Vereinigte Staaten vom Amerika (United States of America)
USSR	Sowjetunion (Union of Soviet Socialist Republics)
UTC	Koordinierte Weltzeit (Universal Time Coordinated)
u.a.	unter anderem

Anhang

A. Tabellarische Resultate des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G

Tabelle 9 Messresultate des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G und deren Auswertung – Messungen vom 14., 15. und 16. August 2018

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
1	68081G	58344.981415133	1.292939705	-1.40356614	14.08.2018	23:33:14	22.372488	-1.676573	-	-	-	-	-
2	68081G	58344.981617928	1.294713735	-1.40248367	14.08.2018	23:33:31	22.446406	-1.673566	17.521	1.290111E-03	5.247963E-05	1.291178E-03	7.369111E-05
3	68081G	58344.981820479	1.300481189	-1.40142929	14.08.2018	23:33:49	22.520050	-1.670637	17.500	1.285329E-03	5.111778E-05	1.286345E-03	7.350372E-05
4	68081G	58344.982023090	1.302252867	-1.40030542	14.08.2018	23:34:06	22.593869	-1.667515	17.506	1.288401E-03	5.448676E-05	1.289552E-03	7.366516E-05
5	68081G	58344.982225874	1.304022121	-1.39521900	14.08.2018	23:34:24	22.667588	-1.664497	17.521	1.286638E-03	5.267113E-05	1.287715E-03	7.349749E-05
6	68081G	58344.982428427	1.305785904	-1.39413869	14.08.2018	23:34:41	22.741079	-1.661496	17.501	1.282659E-03	5.237491E-05	1.283728E-03	7.335346E-05
7	68081G	58344.982631104	1.311566605	-1.39309042	14.08.2018	23:34:59	22.815275	-1.658585	17.511	1.294962E-03	5.082156E-05	1.295959E-03	7.400705E-05
8	68081G	58344.983237709	1.320868726	-1.38590782	14.08.2018	23:35:51	23.036197	-1.649744	52.411	3.855811E-03	1.542968E-04	3.858897E-03	7.362808E-05
9	68081G	58344.983440819	1.322645755	-1.38485379	14.08.2018	23:36:09	23.110240	-1.646816	17.549	1.292292E-03	5.110082E-05	1.293302E-03	7.369786E-05
10	68081G	58344.983846526	1.330187190	-1.38270146	14.08.2018	23:36:44	23.257800	-1.640837	35.053	2.575404E-03	1.043479E-04	2.577517E-03	7.353182E-05
11	68081G	58344.984048278	1.331951692	-1.38164815	14.08.2018	23:37:01	23.331321	-1.637912	17.431	1.283182E-03	5.106591E-05	1.284198E-03	7.367164E-05
12	68081G	58344.984453200	1.335486094	-1.37555090	14.08.2018	23:37:36	23.478587	-1.632086	34.985	2.570290E-03	1.016775E-04	2.572300E-03	7.352525E-05
13	68081G	58344.985029594	1.344521643	-1.37262353	14.08.2018	23:38:26	23.688402	-1.623954	49.800	3.661955E-03	1.419229E-04	3.664704E-03	7.358778E-05
14	68081G	58344.985232287	1.350292552	-1.37157958	14.08.2018	23:38:44	23.762190	-1.621054	17.513	1.287841E-03	5.061212E-05	1.288836E-03	7.359444E-05
15	68081G	58344.985435084	1.352055061	-1.37050720	14.08.2018	23:39:01	23.835628	-1.618076	17.522	1.281733E-03	5.199045E-05	1.282787E-03	7.321148E-05
16	68081G	58344.985637495	1.353829977	-1.36546829	14.08.2018	23:39:19	23.909582	-1.615190	17.488	1.290755E-03	5.036778E-05	1.291738E-03	7.386292E-05
17	68081G	58344.985839207	1.355589247	-1.36447258	14.08.2018	23:39:36	23.982885	-1.612424	17.428	1.279377E-03	4.827338E-05	1.280288E-03	7.346189E-05
18	68081G	58344.986041895	1.361358619	-1.36344015	14.08.2018	23:39:54	24.056609	-1.609556	17.512	1.286724E-03	5.005362E-05	1.287697E-03	7.353123E-05
19	68081G	58344.986894512	1.372807836	-1.35515709	14.08.2018	23:41:07	24.366993	-1.597659	73.666	5.417223E-03	2.076486E-04	5.421202E-03	7.359153E-05
20	68081G	58344.987096407	1.374567057	-1.35416174	14.08.2018	23:41:25	24.440294	-1.594894	17.444	1.279342E-03	4.825593E-05	1.280251E-03	7.339322E-05
21	68081G	58344.987298869	1.380341588	-1.35315956	14.08.2018	23:41:42	24.514233	-1.592110	17.493	1.290475E-03	4.858706E-05	1.291390E-03	7.382442E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
22	68081G	58344.987500609	1.382101841	-1.35213181	14.08.2018	23:42:00	24.587577	-1.589255	17.430	1.280092E-03	4.982673E-05	1.281061E-03	7.349608E-05
23	68081G	58344.987703347	1.383871068	-1.35116346	14.08.2018	23:42:17	24.661295	-1.586565	17.517	1.286618E-03	4.694693E-05	1.287474E-03	7.350040E-05
24	68081G	58344.987906015	1.385644616	-1.35018503	14.08.2018	23:42:35	24.735192	-1.583847	17.511	1.289761E-03	4.743563E-05	1.290633E-03	7.370614E-05
25	68081G	58344.988693495	1.400517278	-1.34230695	14.08.2018	23:43:43	25.021553	-1.573075	68.038	4.997941E-03	1.880146E-04	5.001476E-03	7.350974E-05
26	68081G	58344.988896235	1.402286121	-1.34132385	14.08.2018	23:44:00	25.095255	-1.570344	17.517	1.286339E-03	4.766203E-05	1.287222E-03	7.348524E-05
27	68081G	58344.989098753	1.404056356	-1.34035478	14.08.2018	23:44:18	25.169015	-1.567652	17.498	1.287351E-03	4.698184E-05	1.288208E-03	7.362218E-05
28	68081G	58344.989303375	1.405844565	-1.33540011	14.08.2018	23:44:35	25.243524	-1.565000	17.679	1.300422E-03	4.628371E-05	1.301246E-03	7.360261E-05
29	68081G	58344.989505073	1.411604241	-1.33439504	14.08.2018	23:44:53	25.316843	-1.562208	17.427	1.279672E-03	4.872717E-05	1.280600E-03	7.348490E-05
30	68081G	58344.989707880	1.413373132	-1.33341517	14.08.2018	23:45:10	25.390547	-1.559487	17.523	1.286374E-03	4.750544E-05	1.287251E-03	7.346263E-05
31	68081G	58344.989910847	1.415146414	-1.33247526	14.08.2018	23:45:28	25.464434	-1.556876	17.536	1.289567E-03	4.556812E-05	1.290372E-03	7.358270E-05
32	68081G	58344.990505161	1.424332448	-1.32554682	14.08.2018	23:46:19	25.680519	-1.548741	51.349	3.771390E-03	1.419748E-04	3.774062E-03	7.349864E-05
33	68081G	58344.990910101	1.431871644	-1.32371488	14.08.2018	23:46:54	25.827985	-1.543652	34.987	2.573776E-03	8.881496E-05	2.575308E-03	7.360795E-05
34	68081G	58344.991112817	1.433641854	-1.32281312	14.08.2018	23:47:12	25.901744	-1.541148	17.515	1.287333E-03	4.371856E-05	1.288075E-03	7.354268E-05
35	68081G	58344.991315233	1.435404049	-1.32182498	14.08.2018	23:47:29	25.975169	-1.538403	17.489	1.281504E-03	4.790638E-05	1.282399E-03	7.332714E-05
36	68081G	58344.991517912	1.441174619	-1.32092574	14.08.2018	23:47:47	26.048942	-1.535905	17.511	1.287595E-03	4.359639E-05	1.288333E-03	7.357081E-05
37	68081G	58344.991720582	1.442943581	-1.31599339	14.08.2018	23:48:04	26.122649	-1.533315	17.511	1.286425E-03	4.520160E-05	1.287219E-03	7.351049E-05
38	68081G	58345.822966548	21.523034286	-5.40056013	15.08.2018	19:45:04	328.126429	-5.668223	71819.651	5.270960E+00	-7.216775E-02	5.271454E+00	7.339849E-05
39	68081G	58345.823146148	21.524633602	-5.39428293	15.08.2018	19:45:19	328.193067	-5.661897	15.517	1.163055E-03	1.104018E-04	1.168284E-03	7.528842E-05
40	68081G	58345.823330392	21.530261190	-5.39201076	15.08.2018	19:45:35	328.260883	-5.655585	15.919	1.183615E-03	1.101579E-04	1.188730E-03	7.467519E-05
41	68081G	58345.823508046	21.531837753	-5.38569181	15.08.2018	19:45:51	328.326573	-5.649144	15.349	1.146509E-03	1.124259E-04	1.152008E-03	7.505277E-05
42	68081G	58345.823689556	21.533449429	-5.38342145	15.08.2018	19:46:06	328.393726	-5.642837	15.682	1.172044E-03	1.100702E-04	1.177201E-03	7.506480E-05
43	68081G	58345.823867329	21.535027768	-5.38118637	15.08.2018	19:46:22	328.459490	-5.636629	15.360	1.147801E-03	1.083597E-04	1.152904E-03	7.506087E-05
44	68081G	58345.912647944	0.043652297	-2.52050985	15.08.2018	21:54:12	1.152179	-2.868083	7670.645	5.705951E-01	4.832024E-02	5.726374E-01	7.465309E-05
45	68081G	58345.912848979	0.045425695	-2.51462131	15.08.2018	21:54:30	1.226071	-2.862837	17.369	1.289651E-03	9.155900E-05	1.292897E-03	7.443525E-05
46	68081G	58345.913050035	0.051194196	-2.51277740	15.08.2018	21:54:47	1.299758	-2.857715	17.371	1.286090E-03	8.939528E-05	1.289193E-03	7.421425E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
47	68081G	58345.913251271	0.052961930	-2.51092269	15.08.2018	21:55:04	1.373414	-2.852563	17.387	1.285532E-03	8.991888E-05	1.288673E-03	7.411796E-05
48	68081G	58345.913453418	0.054740582	-2.50510398	15.08.2018	21:55:22	1.447524	-2.847511	17.466	1.293472E-03	8.817355E-05	1.296474E-03	7.423057E-05
49	68081G	58345.913655425	0.060522811	-2.50319420	15.08.2018	21:55:39	1.521784	-2.842206	17.453	1.296074E-03	9.258875E-05	1.299376E-03	7.444831E-05
50	68081G	58345.913857413	0.062297503	-2.50132114	15.08.2018	21:55:57	1.595729	-2.837003	17.452	1.290592E-03	9.080851E-05	1.293783E-03	7.413482E-05
51	68081G	58345.914486505	0.071831039	-2.49163462	15.08.2018	21:56:51	1.826293	-2.821207	54.354	4.024101E-03	2.756903E-04	4.033534E-03	7.420920E-05
52	68081G	58345.914688987	0.073612714	-2.48573564	15.08.2018	21:57:09	1.900530	-2.815932	17.494	1.295671E-03	9.206515E-05	1.298937E-03	7.424856E-05
53	68081G	58345.914891124	0.075387430	-2.48389173	15.08.2018	21:57:26	1.974476	-2.810810	17.465	1.290610E-03	8.939528E-05	1.293702E-03	7.407553E-05
54	68081G	58345.915093205	0.081172273	-2.48207123	15.08.2018	21:57:44	2.048845	-2.805753	17.460	1.297974E-03	8.826033E-05	1.300972E-03	7.451241E-05
55	68081G	58345.915295423	0.082948548	-2.48028456	15.08.2018	21:58:01	2.122856	-2.800790	17.472	1.291744E-03	8.662021E-05	1.294645E-03	7.409980E-05
56	68081G	58345.915496629	0.084721464	-2.47442266	15.08.2018	21:58:18	2.196728	-2.795619	17.384	1.289301E-03	9.026746E-05	1.292457E-03	7.434665E-05
57	68081G	58345.915698965	0.090498147	-2.47256760	15.08.2018	21:58:36	2.270756	-2.790466	17.482	1.292040E-03	8.993585E-05	1.295167E-03	7.408645E-05
58	68081G	58345.963572885	1.190470169	-1.47168328	15.08.2018	23:07:32	19.769590	-1.788009	4136.307	3.054123E-01	1.749617E-02	3.059130E-01	7.395801E-05
59	68081G	58345.963773808	1.192223974	-1.47048093	15.08.2018	23:07:50	19.842666	-1.784669	17.360	1.275403E-03	5.829157E-05	1.276734E-03	7.354568E-05
60	68081G	58345.963974763	1.193984042	-1.46532682	15.08.2018	23:08:07	19.916002	-1.781463	17.363	1.279958E-03	5.595283E-05	1.281180E-03	7.379001E-05
61	68081G	58345.964176160	1.195740702	-1.46413491	15.08.2018	23:08:24	19.989196	-1.778153	17.401	1.277479E-03	5.778543E-05	1.278785E-03	7.349046E-05
62	68081G	58345.964379416	1.201521841	-1.46291313	15.08.2018	23:08:42	20.063410	-1.774759	17.561	1.295281E-03	5.923357E-05	1.296635E-03	7.383469E-05
63	68081G	58345.964580535	1.203283852	-1.46177990	15.08.2018	23:08:59	20.136827	-1.771611	17.377	1.281371E-03	5.494054E-05	1.282548E-03	7.380856E-05
64	68081G	58345.964781083	1.205033865	-1.46054372	15.08.2018	23:09:17	20.209744	-1.768177	17.327	1.272645E-03	5.993170E-05	1.274056E-03	7.352861E-05
65	68081G	58345.965332096	1.213853881	-1.45334922	15.08.2018	23:10:04	20.410578	-1.759303	47.608	3.505215E-03	1.548737E-04	3.508634E-03	7.369916E-05
66	68081G	58345.965534473	1.215625131	-1.45220843	15.08.2018	23:10:22	20.484380	-1.756135	17.485	1.288089E-03	5.530706E-05	1.289276E-03	7.373455E-05
67	68081G	58345.965736787	1.221393382	-1.45106656	15.08.2018	23:10:39	20.558058	-1.752963	17.480	1.285908E-03	5.535942E-05	1.287099E-03	7.363299E-05
68	68081G	58345.965939073	1.223159472	-1.44587537	15.08.2018	23:10:57	20.631645	-1.749654	17.478	1.284337E-03	5.775052E-05	1.285635E-03	7.355937E-05
69	68081G	58345.966141439	1.224934658	-1.44470146	15.08.2018	23:11:14	20.705611	-1.746393	17.484	1.290952E-03	5.691276E-05	1.292206E-03	7.390611E-05
70	68081G	58345.966344094	1.230703749	-1.44355960	15.08.2018	23:11:32	20.779323	-1.743221	17.509	1.286519E-03	5.535893E-05	1.287710E-03	7.354395E-05
71	68081G	58345.966546554	1.232475383	-1.44241665	15.08.2018	23:11:49	20.853141	-1.740046	17.493	1.288369E-03	5.541178E-05	1.289560E-03	7.372053E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
72	68081G	58345.967425324	1.244155894	-1.43340352	15.08.2018	23:13:05	21.173162	-1.726121	75.926	5.585425E-03	2.430434E-04	5.590711E-03	7.363394E-05
73	68081G	58345.967626752	1.245916272	-1.43229801	15.08.2018	23:13:22	21.246511	-1.723050	17.403	1.280183E-03	5.359664E-05	1.281304E-03	7.362389E-05
74	68081G	58345.967827624	1.251679194	-1.43120041	15.08.2018	23:13:40	21.319966	-1.720001	17.355	1.282033E-03	5.321315E-05	1.283137E-03	7.393326E-05
75	68081G	58345.968028718	1.253433189	-1.43003839	15.08.2018	23:13:57	21.393050	-1.716773	17.375	1.275541E-03	5.633632E-05	1.276785E-03	7.348603E-05
76	68081G	58345.968230856	1.255198726	-1.42492820	15.08.2018	23:14:15	21.466614	-1.713689	17.465	1.283935E-03	5.382353E-05	1.285062E-03	7.358046E-05
77	68081G	58345.968431753	1.260953392	-1.42377337	15.08.2018	23:14:32	21.539725	-1.710482	17.358	1.276029E-03	5.598774E-05	1.277257E-03	7.358530E-05
78	68081G	58345.968632985	1.262712642	-1.42265599	15.08.2018	23:14:49	21.613027	-1.707378	17.386	1.279363E-03	5.417211E-05	1.280509E-03	7.364985E-05
79	68081G	58346.005478844	2.200020769	-1.16532353	16.08.2018	00:07:53	35.000865	-1.281454	3183.482	2.336619E-01	7.433767E-03	2.337801E-01	7.343534E-05
80	68081G	58346.005882273	2.203534200	-1.16421840	16.08.2018	00:08:28	35.147258	-1.278384	34.856	2.555039E-03	5.357821E-05	2.555601E-03	7.331826E-05
81	68081G	58346.006084800	2.205295787	-1.16366475	16.08.2018	00:08:45	35.220658	-1.276847	17.498	1.281062E-03	2.684171E-05	1.281343E-03	7.322660E-05
82	68081G	58346.006287132	2.211052646	-1.16309707	16.08.2018	00:09:03	35.293860	-1.275270	17.481	1.277624E-03	2.752190E-05	1.277920E-03	7.310136E-05
83	68081G	58346.006489665	2.212812049	-1.16260929	16.08.2018	00:09:20	35.367169	-1.273915	17.499	1.279474E-03	2.364824E-05	1.279692E-03	7.313008E-05
84	68081G	58346.006691971	2.214572220	-1.16206608	16.08.2018	00:09:38	35.440509	-1.272406	17.479	1.280032E-03	2.633556E-05	1.280303E-03	7.324709E-05
85	68081G	58346.007255291	2.223473926	-1.16057865	16.08.2018	00:10:26	35.644747	-1.268274	48.671	3.564621E-03	7.211264E-05	3.565351E-03	7.325433E-05
86	68081G	58346.007457783	2.225230041	-1.16006280	16.08.2018	00:10:44	35.717918	-1.266841	17.495	1.277083E-03	2.500911E-05	1.277328E-03	7.300973E-05
87	68081G	58346.007660846	2.231000603	-1.15554839	16.08.2018	00:11:01	35.791692	-1.265412	17.545	1.287589E-03	2.493930E-05	1.287831E-03	7.340306E-05
88	68081G	58346.007863108	2.232759141	-1.15501994	16.08.2018	00:11:19	35.864964	-1.263944	17.475	1.278845E-03	2.561998E-05	1.279102E-03	7.319425E-05
89	68081G	58346.008066278	2.234526823	-1.15450049	16.08.2018	00:11:36	35.938618	-1.262501	17.554	1.285495E-03	2.518365E-05	1.285741E-03	7.324539E-05
90	68081G	58346.008268503	2.240285698	-1.15397996	16.08.2018	00:11:54	36.011904	-1.261055	17.472	1.279090E-03	2.523601E-05	1.279339E-03	7.322123E-05
91	68081G	58346.008469634	2.242032165	-1.15349291	16.08.2018	00:12:11	36.084674	-1.259703	17.378	1.270067E-03	2.361285E-05	1.270286E-03	7.309856E-05
92	68081G	58346.852083820	22.511494802	-4.18467999	16.08.2018	20:27:00	342.812283	-4.313000	72888.266	5.353407E+00	-5.329009E-02	5.353672E+00	7.345040E-05
93	68081G	58346.852287911	22.513300333	-4.18233988	16.08.2018	20:27:17	342.887514	-4.306500	17.633	1.313019E-03	1.134517E-04	1.317911E-03	7.473923E-05
94	68081G	58346.852502278	22.515192525	-4.17583490	16.08.2018	20:27:36	342.966355	-4.299541	18.521	1.376041E-03	1.214449E-04	1.381390E-03	7.458380E-05
95	68081G	58346.852707713	22.521008208	-4.17353655	16.08.2018	20:27:53	343.042009	-4.293157	17.750	1.320402E-03	1.114272E-04	1.325095E-03	7.465500E-05
96	68081G	58346.852913810	22.522836633	-4.17112372	16.08.2018	20:28:11	343.118193	-4.286455	17.807	1.329668E-03	1.169773E-04	1.334804E-03	7.496042E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
97	68081G	58346.853119461	22.524657523	-4.16472854	16.08.2018	20:28:29	343.194063	-4.279802	17.768	1.324189E-03	1.161216E-04	1.329270E-03	7.481157E-05
98	68081G	58346.853324735	22.530467541	-4.16239672	16.08.2018	20:28:47	343.269481	-4.273324	17.736	1.316282E-03	1.130498E-04	1.321128E-03	7.448987E-05
99	68081G	58346.853838214	22.535002113	-4.15251802	16.08.2018	20:29:31	343.458421	-4.256995	44.365	3.297634E-03	2.850074E-04	3.309927E-03	7.460742E-05
100	68081G	58346.854044423	22.540840066	-4.15015596	16.08.2018	20:29:49	343.535003	-4.250433	17.816	1.336597E-03	1.145159E-04	1.341494E-03	7.529521E-05
101	68081G	58346.854252763	22.542665346	-4.14375538	16.08.2018	20:30:07	343.611056	-4.243765	18.001	1.327381E-03	1.163834E-04	1.332473E-03	7.402394E-05
102	68081G	58346.854457191	22.544478555	-4.14134580	16.08.2018	20:30:25	343.686606	-4.237072	17.663	1.318603E-03	1.168197E-04	1.323767E-03	7.494757E-05
103	68081G	58346.854663089	22.550296131	-4.13498302	16.08.2018	20:30:42	343.762339	-4.230508	17.790	1.321779E-03	1.145508E-04	1.326733E-03	7.457919E-05
104	68081G	58346.854868614	22.552100700	-4.13266704	16.08.2018	20:31:00	343.837529	-4.224075	17.757	1.312320E-03	1.122819E-04	1.317114E-03	7.417286E-05
105	68081G	58346.855074653	22.553933804	-4.13031614	16.08.2018	20:31:18	343.913909	-4.217545	17.802	1.333071E-03	1.139748E-04	1.337934E-03	7.515737E-05
106	68081G	58346.893174372	23.514136244	-3.05448129	16.08.2018	21:26:10	357.922344	-3.095781	3291.816	2.444933E-01	1.957847E-02	2.452760E-01	7.451084E-05
107	68081G	58346.893380233	23.515950977	-3.05249444	16.08.2018	21:26:28	357.997957	-3.090262	17.786	1.319711E-03	9.632521E-05	1.323222E-03	7.439518E-05
108	68081G	58346.893584731	23.521750518	-3.05049104	16.08.2018	21:26:45	358.072938	-3.084697	17.669	1.308663E-03	9.712757E-05	1.312263E-03	7.427077E-05
109	68081G	58346.893789092	23.523549579	-3.04453191	16.08.2018	21:27:03	358.147899	-3.079255	17.657	1.308314E-03	9.498130E-05	1.311757E-03	7.429194E-05
110	68081G	58346.894201129	23.531178179	-3.04050026	16.08.2018	21:27:38	358.299091	-3.068056	35.600	2.638792E-03	1.954599E-04	2.646022E-03	7.432645E-05
111	68081G	58346.894407790	23.532993151	-3.03448750	16.08.2018	21:27:56	358.374715	-3.062465	17.856	1.319885E-03	9.758136E-05	1.323487E-03	7.412206E-05
112	68081G	58346.894922817	23.541533028	-3.02563072	16.08.2018	21:28:41	358.563876	-3.048974	44.498	3.301492E-03	2.354633E-04	3.309878E-03	7.438206E-05
113	68081G	58346.895129073	23.543347663	-3.02367232	16.08.2018	21:28:59	358.639486	-3.043534	17.821	1.319640E-03	9.494591E-05	1.323051E-03	7.424313E-05
114	68081G	58346.895336062	23.545170649	-3.02164156	16.08.2018	21:29:17	358.715444	-3.037893	17.884	1.325713E-03	9.845402E-05	1.329364E-03	7.433319E-05
115	68081G	58346.895554213	23.551096878	-3.01557155	16.08.2018	21:29:35	358.795703	-3.032143	18.848	1.400793E-03	1.003569E-04	1.404384E-03	7.451004E-05
116	68081G	58346.895758074	23.552887370	-3.01362863	16.08.2018	21:29:53	358.870307	-3.026746	17.614	1.302083E-03	9.419542E-05	1.305485E-03	7.411806E-05
117	68081G	58346.895964635	23.554705772	-3.01166627	16.08.2018	21:30:11	358.946074	-3.021295	17.847	1.322379E-03	9.513790E-05	1.325797E-03	7.428738E-05
118	68081G	58346.896171292	23.560522830	-3.00563767	16.08.2018	21:30:29	359.021785	-3.015660	17.855	1.321402E-03	9.834930E-05	1.325057E-03	7.421140E-05
119	68081G	58346.925596238	0.391163207	-2.18231568	16.08.2018	22:12:51	9.798467	-2.306432	2542.315	1.880886E-01	1.237836E-02	1.884955E-01	7.414323E-05
120	68081G	58346.925799554	0.392946068	-2.18071048	16.08.2018	22:13:09	9.872753	-2.301974	17.567	1.296533E-03	7.782229E-05	1.298867E-03	7.393996E-05
121	68081G	58346.926003297	0.394741577	-2.17520139	16.08.2018	22:13:26	9.947566	-2.297782	17.603	1.305731E-03	7.316275E-05	1.307779E-03	7.429130E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
122	68081G	58346.926206629	0.400523526	-2.17360267	16.08.2018	22:13:44	10.021814	-2.293341	17.568	1.295870E-03	7.750813E-05	1.298186E-03	7.389539E-05
123	68081G	58346.926408519	0.402299859	-2.17203887	16.08.2018	22:14:01	10.095827	-2.288997	17.443	1.291786E-03	7.581516E-05	1.294009E-03	7.418373E-05
124	68081G	58346.926610461	0.404065945	-2.17049379	16.08.2018	22:14:19	10.169414	-2.284705	17.448	1.284334E-03	7.490759E-05	1.286517E-03	7.373522E-05
125	68081G	58346.926817675	0.405885571	-2.16492783	16.08.2018	22:14:37	10.245232	-2.280355	17.903	1.323269E-03	7.591988E-05	1.325445E-03	7.403363E-05
126	68081G	58346.927348851	0.414543168	-2.16085309	16.08.2018	22:15:22	10.439299	-2.269036	45.894	3.387100E-03	1.975490E-04	3.392856E-03	7.392873E-05
127	68081G	58346.927551323	0.420321349	-2.15524357	16.08.2018	22:15:40	10.513390	-2.264565	17.494	1.293130E-03	7.803173E-05	1.295482E-03	7.405470E-05
128	68081G	58346.927752972	0.422092186	-2.15375393	16.08.2018	22:15:57	10.587174	-2.260428	17.422	1.287789E-03	7.221979E-05	1.289812E-03	7.403154E-05
129	68081G	58346.927957074	0.423881885	-2.15219697	16.08.2018	22:16:15	10.661745	-2.256103	17.634	1.301506E-03	7.548355E-05	1.303693E-03	7.392891E-05
130	68081G	58346.928159072	0.425652578	-2.15063245	16.08.2018	22:16:32	10.735524	-2.251757	17.453	1.287684E-03	7.585007E-05	1.289916E-03	7.390958E-05
131	68081G	58346.928362333	0.431433781	-2.14506901	16.08.2018	22:16:50	10.809741	-2.247414	17.562	1.295327E-03	7.579771E-05	1.297543E-03	7.388462E-05
132	68081G	58346.928565148	0.433215705	-2.14351565	16.08.2018	22:17:08	10.883988	-2.243099	17.523	1.295852E-03	7.530902E-05	1.298038E-03	7.407534E-05

B. Tabellarische Resultate des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 76092F

Tabelle 10 Messresultate des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 76092F und deren Auswertung – Messungen vom 15. und 16. August 2018

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
1	76092F	58345.890583462	23.13233658	-0.33243368	15.08.2018	21:22:26	348.347358	-0.556760	-	-	-	-	-
2	76092F	58345.890941735	23.13543192	-0.32115403	15.08.2018	21:22:57	348.476330	-0.536539	30.955	2.250995E-03	3.529274E-04	2.278494E-03	7.360716E-05
3	76092F	58345.891301966	23.14254445	-0.30579051	15.08.2018	21:23:28	348.606019	-0.516085	31.124	2.263490E-03	3.569935E-04	2.291469E-03	7.362396E-05
4	76092F	58345.891483164	23.14411011	-0.30212837	15.08.2018	21:23:44	348.671255	-0.505912	15.656	1.138586E-03	1.775456E-04	1.152346E-03	7.360640E-05
5	76092F	58345.891664259	23.14567151	-0.29447523	15.08.2018	21:23:59	348.736313	-0.495765	15.647	1.135480E-03	1.771092E-04	1.149209E-03	7.344783E-05
6	76092F	58345.906925555	23.36575194	0.20050438	15.08.2018	21:45:58	354.239664	0.334734	1318.576	9.605160E-02	1.449494E-02	9.713914E-02	7.366973E-05
7	76092F	58345.907130047	23.37152859	0.20437742	15.08.2018	21:46:16	354.313691	0.345493	17.668	1.292019E-03	1.877703E-04	1.305592E-03	7.389542E-05
8	76092F	58345.907330936	23.37326959	0.21219609	15.08.2018	21:46:33	354.386233	0.356100	17.357	1.266084E-03	1.851343E-04	1.279549E-03	7.372026E-05
9	76092F	58345.907531763	23.37501139	0.22000720	15.08.2018	21:46:50	354.458808	0.366687	17.351	1.266679E-03	1.847678E-04	1.280083E-03	7.377385E-05
10	76092F	58345.907734260	23.38076472	0.22374344	15.08.2018	21:47:08	354.531863	0.377065	17.496	1.275055E-03	1.811380E-04	1.287857E-03	7.360974E-05
11	76092F	58345.907936600	23.38251656	0.23153907	15.08.2018	21:47:25	354.604857	0.387609	17.482	1.273973E-03	1.840173E-04	1.287195E-03	7.362898E-05
12	76092F	58345.908138725	23.38427639	0.23536278	15.08.2018	21:47:43	354.678183	0.398230	17.464	1.279784E-03	1.853787E-04	1.293140E-03	7.404775E-05
13	76092F	58345.910188604	23.41405563	0.30163440	15.08.2018	21:50:40	355.418984	0.504540	177.110	1.292943E-02	1.855460E-03	1.306189E-02	7.375032E-05
14	76092F	58345.910391087	23.41581354	0.30538826	15.08.2018	21:50:57	355.492231	0.514967	17.495	1.278387E-03	1.819923E-04	1.291276E-03	7.381027E-05
15	76092F	58345.910592347	23.42155762	0.31311261	15.08.2018	21:51:15	355.564901	0.525313	17.389	1.268334E-03	1.805616E-04	1.281122E-03	7.367484E-05
16	76092F	58345.910794796	23.42331956	0.32087511	15.08.2018	21:51:32	355.638315	0.535764	17.492	1.281319E-03	1.824111E-04	1.294238E-03	7.399200E-05
17	76092F	58345.910997451	23.42507526	0.32454942	15.08.2018	21:51:50	355.711469	0.545971	17.509	1.276780E-03	1.781356E-04	1.289147E-03	7.362604E-05
18	76092F	58345.911200186	23.43083055	0.33233208	15.08.2018	21:52:07	355.784606	0.556478	17.516	1.276484E-03	1.833885E-04	1.289591E-03	7.362230E-05
19	76092F	58345.911402731	23.43259227	0.34009530	15.08.2018	21:52:25	355.858011	0.566931	17.500	1.281161E-03	1.824461E-04	1.294087E-03	7.394828E-05
20	76092F	58345.927221006	0.06213366	1.20255281	15.08.2018	22:15:11	1.588903	1.340424	1366.699	1.000229E-01	1.350000E-02	1.009299E-01	7.384936E-05
21	76092F	58345.927400048	0.06369124	1.20551503	15.08.2018	22:15:27	1.653802	1.348653	15.469	1.132703E-03	1.436125E-04	1.141771E-03	7.380914E-05
22	76092F	58345.927577818	0.06524205	1.21249453	15.08.2018	22:15:42	1.718419	1.356929	15.359	1.127782E-03	1.444502E-04	1.136995E-03	7.402634E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
23	76092F	58345.927756739	0.07079869	1.21548915	15.08.2018	22:15:58	1.783279	1.365248	15.459	1.132022E-03	1.451833E-04	1.141294E-03	7.382823E-05
24	76092F	58345.927934095	0.07234139	1.22247477	15.08.2018	22:16:13	1.847558	1.373541	15.324	1.121882E-03	1.447469E-04	1.131182E-03	7.381977E-05
25	76092F	58345.928112780	0.07389911	1.22543555	15.08.2018	22:16:28	1.912463	1.381765	15.438	1.132807E-03	1.435427E-04	1.141866E-03	7.396277E-05
26	76092F	58345.928291513	0.07545825	1.23236285	15.08.2018	22:16:44	1.977427	1.389897	15.443	1.133837E-03	1.419195E-04	1.142684E-03	7.399593E-05
27	76092F	58345.958847528	0.52258824	2.38351066	15.08.2018	23:00:44	13.107843	2.643085	2640.040	1.942624E-01	2.187226E-02	1.954898E-01	7.404807E-05
28	76092F	58345.959252286	0.53013873	2.39267866	15.08.2018	23:01:19	13.255781	2.657441	34.971	2.581991E-03	2.505517E-04	2.594119E-03	7.417897E-05
29	76092F	58345.959454621	0.53191302	2.39522756	15.08.2018	23:01:36	13.329709	2.664521	17.482	1.290297E-03	1.235742E-04	1.296201E-03	7.414599E-05
30	76092F	58345.959657995	0.53369715	2.40182865	15.08.2018	23:01:54	13.404048	2.671746	17.572	1.297453E-03	1.261044E-04	1.303567E-03	7.418638E-05
31	76092F	58345.959860303	0.53547076	2.40440635	15.08.2018	23:02:11	13.477948	2.678907	17.479	1.289808E-03	1.249704E-04	1.295849E-03	7.413571E-05
32	76092F	58345.960426720	0.54444055	2.41555630	15.08.2018	23:03:00	13.685023	2.698768	48.938	3.614137E-03	3.466394E-04	3.630722E-03	7.418960E-05
33	76092F	58345.960629238	0.55021705	2.42213868	15.08.2018	23:03:18	13.759044	2.705941	17.498	1.291902E-03	1.251973E-04	1.297954E-03	7.417918E-05
34	76092F	58345.960831837	0.55199321	2.42466778	15.08.2018	23:03:35	13.833050	2.712966	17.505	1.291659E-03	1.226142E-04	1.297465E-03	7.412158E-05
35	76092F	58345.961032773	0.55375480	2.43117168	15.08.2018	23:03:53	13.906450	2.719921	17.361	1.281064E-03	1.213925E-04	1.286803E-03	7.412089E-05
36	76092F	58345.961233852	0.55552253	2.43369898	15.08.2018	23:04:10	13.980105	2.726942	17.373	1.285532E-03	1.225270E-04	1.291358E-03	7.433037E-05
37	76092F	58345.961635902	0.56305130	2.44273234	15.08.2018	23:04:45	14.127138	2.740923	34.737	2.566195E-03	2.440242E-04	2.577771E-03	7.420796E-05
38	76092F	58346.001588179	1.55077644	3.48164730	16.08.2018	00:02:17	28.782352	3.804576	3451.877	2.557817E-01	1.856424E-02	2.564545E-01	7.429423E-05
39	76092F	58346.001789356	1.55255373	3.48296293	16.08.2018	00:02:34	28.856405	3.808230	17.382	1.292480E-03	6.378354E-05	1.294052E-03	7.444916E-05
40	76092F	58346.001991794	1.55434042	3.48427747	16.08.2018	00:02:52	28.930851	3.811882	17.491	1.299321E-03	6.373070E-05	1.300883E-03	7.437596E-05
41	76092F	58346.002194426	1.56012923	3.48563593	16.08.2018	00:03:09	29.005385	3.815655	17.507	1.300856E-03	6.586000E-05	1.302523E-03	7.439838E-05
42	76092F	58346.002396513	1.56191201	3.49091952	16.08.2018	00:03:27	29.079667	3.819221	17.460	1.296476E-03	6.223020E-05	1.297969E-03	7.433823E-05
43	76092F	58346.002598859	1.56369952	3.49226646	16.08.2018	00:03:44	29.154147	3.822962	17.483	1.299914E-03	6.530149E-05	1.301553E-03	7.444809E-05
44	76092F	58346.002801282	1.56548715	3.49356444	16.08.2018	00:04:02	29.228631	3.826568	17.489	1.300001E-03	6.292785E-05	1.301523E-03	7.441807E-05
45	76092F	58346.003373176	1.57453548	3.50122911	16.08.2018	00:04:51	29.438978	3.836748	49.412	3.671246E-03	1.776682E-04	3.675542E-03	7.438616E-05
46	76092F	58346.003575624	1.58032210	3.50248822	16.08.2018	00:05:08	29.513421	3.840245	17.492	1.299268E-03	6.104338E-05	1.300701E-03	7.436188E-05
47	76092F	58346.003778999	1.58211887	3.50377145	16.08.2018	00:05:26	29.588286	3.843810	17.572	1.306650E-03	6.221275E-05	1.308130E-03	7.444572E-05
48	76092F	58346.003981414	1.58390571	3.50506259	16.08.2018	00:05:43	29.662738	3.847396	17.489	1.299425E-03	6.259623E-05	1.300931E-03	7.438716E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
49	76092F	58346.004184094	1.58569564	3.51031414	16.08.2018	00:06:01	29.737318	3.850873	17.512	1.301677E-03	6.067686E-05	1.303090E-03	7.441317E-05
50	76092F	58346.004386552	1.59148445	3.51157181	16.08.2018	00:06:18	29.811852	3.854366	17.492	1.300856E-03	6.097356E-05	1.302284E-03	7.444868E-05
51	76092F	58346.848228256	22.170727241	-2.55455831	16.08.2018	20:21:26	334.280302	-2.929329	72907.923	5.313977E+00	-1.183978E-01	5.315296E+00	7.290423E-05
52	76092F	58346.848436713	22.172517340	-2.54577748	16.08.2018	20:21:44	334.354889	-2.916049	18.011	1.301797E-03	2.317812E-04	1.322270E-03	7.341585E-05
53	76092F	58346.848642554	22.174280487	-2.54104668	16.08.2018	20:22:02	334.428354	-2.902907	17.785	1.282197E-03	2.293557E-04	1.302548E-03	7.323998E-05
54	76092F	58346.848845439	22.180015483	-2.53241668	16.08.2018	20:22:20	334.500645	-2.890046	17.529	1.261725E-03	2.244687E-04	1.281536E-03	7.310839E-05
55	76092F	58346.849258843	22.183554520	-2.51496806	16.08.2018	20:22:55	334.648105	-2.863800	35.718	2.573660E-03	4.580820E-04	2.614109E-03	7.318723E-05
56	76092F	58346.849991632	22.193841138	-2.49014191	16.08.2018	20:23:59	334.910047	-2.817061	63.313	4.571758E-03	8.157548E-04	4.643966E-03	7.334937E-05
57	76092F	58346.850196279	22.195593028	-2.48145972	16.08.2018	20:24:16	334.983043	-2.804055	17.682	1.274010E-03	2.269990E-04	1.294075E-03	7.318809E-05
58	76092F	58346.850402050	22.201358622	-2.47273829	16.08.2018	20:24:34	335.056609	-2.790940	17.779	1.283976E-03	2.289014E-04	1.304220E-03	7.335894E-05
59	76092F	58346.850608670	22.203128223	-2.46405071	16.08.2018	20:24:52	335.130343	-2.777919	17.852	1.286890E-03	2.272603E-04	1.306803E-03	7.320217E-05
60	76092F	58346.850816010	22.204912176	-2.45530732	16.08.2018	20:25:10	335.204674	-2.764743	17.914	1.297327E-03	2.299660E-04	1.317552E-03	7.354799E-05
61	76092F	58346.851022189	22.210675753	-2.45059850	16.08.2018	20:25:28	335.278156	-2.751663	17.814	1.282509E-03	2.282900E-04	1.302669E-03	7.312669E-05
62	76092F	58346.889370441	23.160683248	-0.26568658	16.08.2018	21:20:41	349.028469	-0.449129	3313.289	2.399882E-01	4.018678E-02	2.433297E-01	7.344052E-05
63	76092F	58346.889575868	23.162459077	-0.26153917	16.08.2018	21:20:59	349.102462	-0.437609	17.749	1.291419E-03	2.010721E-04	1.306979E-03	7.363721E-05
64	76092F	58346.889782783	23.164247482	-0.25335577	16.08.2018	21:21:17	349.176978	-0.425988	17.877	1.300565E-03	2.028170E-04	1.316284E-03	7.362815E-05
65	76092F	58346.889985762	23.170001927	-0.24526345	16.08.2018	21:21:34	349.250080	-0.414621	17.537	1.275868E-03	1.984013E-04	1.291202E-03	7.362570E-05
66	76092F	58346.890194403	23.171802763	-0.24105701	16.08.2018	21:21:52	349.325115	-0.402936	18.027	1.309605E-03	2.039340E-04	1.325388E-03	7.352410E-05
67	76092F	58346.890399865	23.173579311	-0.23292364	16.08.2018	21:22:10	349.399138	-0.391455	17.752	1.291942E-03	2.003914E-04	1.307391E-03	7.364788E-05
68	76092F	58346.890604184	23.175345515	-0.22485868	16.08.2018	21:22:28	349.472730	-0.380163	17.653	1.284420E-03	1.970748E-04	1.299451E-03	7.361009E-05
69	76092F	58346.891173738	23.184271112	-0.20535281	16.08.2018	21:23:17	349.677963	-0.348202	49.209	3.581995E-03	5.578203E-04	3.625169E-03	7.366813E-05
70	76092F	58346.891386917	23.190112696	-0.20115933	16.08.2018	21:23:35	349.754696	-0.336554	18.419	1.339238E-03	2.033056E-04	1.354581E-03	7.354395E-05
71	76092F	58346.891591915	23.191883580	-0.19302886	16.08.2018	21:23:53	349.828483	-0.325080	17.712	1.287823E-03	2.002508E-04	1.303299E-03	7.358356E-05
72	76092F	58346.891797683	23.193663727	-0.18490738	16.08.2018	21:24:11	349.902655	-0.313632	17.778	1.294559E-03	1.998150E-04	1.309889E-03	7.367889E-05
73	76092F	58346.892004136	23.195452441	-0.18077655	16.08.2018	21:24:29	349.977185	-0.302157	17.838	1.300790E-03	2.002683E-04	1.316116E-03	7.378348E-05
74	76092F	58346.892209779	23.201221932	-0.17268567	16.08.2018	21:24:46	350.050914	-0.290794	17.768	1.286810E-03	1.983315E-04	1.302005E-03	7.327989E-05

Nr.	Tracklet Name	Mod. Jul. Datum (d)	Rektaszension [hh.mmssxxxx]	Deklination (dd.mmssxxxx)	Datum	Zeit	RA (°)	DEC (°)	Delta MJD (s)	Delta RA (rad)	Delta DEC (rad)	Winkeldiff. (rad)	Winkelgeschw. (rad/s)
75	76092F	58346.892413051	23.202983959	-0.16464124	16.08.2018	21:25:04	350.124332	-0.279559	17.563	1.281382E-03	1.960795E-04	1.296298E-03	7.380970E-05
76	76092F	58346.921669180	0.024816713	1.13330599	16.08.2018	22:07:12	0.700696	1.225850	2527.730	1.845924E-01	2.627434E-02	1.864529E-01	7.376300E-05
77	76092F	58346.921871297	0.030578403	1.14074087	16.08.2018	22:07:29	0.774100	1.235391	17.463	1.281137E-03	1.665277E-04	1.291915E-03	7.398050E-05
78	76092F	58346.922073231	0.032335870	1.14417791	16.08.2018	22:07:47	0.847328	1.244939	17.447	1.278066E-03	1.666324E-04	1.288883E-03	7.387378E-05
79	76092F	58346.922278125	0.034121750	1.15165202	16.08.2018	22:08:04	0.921740	1.254589	17.703	1.298729E-03	1.684296E-04	1.309605E-03	7.397709E-05
80	76092F	58346.922480873	0.035885984	1.15505774	16.08.2018	22:08:22	0.995249	1.264049	17.517	1.282987E-03	1.651140E-04	1.293568E-03	7.384465E-05
81	76092F	58346.922683690	0.041651922	1.16247678	16.08.2018	22:08:39	1.068830	1.273547	17.523	1.284226E-03	1.657597E-04	1.294880E-03	7.389437E-05
82	76092F	58346.922886685	0.043419323	1.16592462	16.08.2018	22:08:57	1.142472	1.283124	17.539	1.285290E-03	1.671560E-04	1.296114E-03	7.389996E-05
83	76092F	58346.923471266	0.052509018	1.18376811	16.08.2018	22:09:47	1.354542	1.310467	50.508	3.701331E-03	4.772259E-04	3.731969E-03	7.388897E-05
84	76092F	58346.923671886	0.054257436	1.19112883	16.08.2018	22:10:05	1.427393	1.319802	17.334	1.271485E-03	1.629323E-04	1.281882E-03	7.395375E-05
85	76092F	58346.923873612	0.060013029	1.19452555	16.08.2018	22:10:22	1.500543	1.329238	17.429	1.276703E-03	1.646776E-04	1.287280E-03	7.385798E-05
86	76092F	58346.924076424	0.061782901	1.20194098	16.08.2018	22:10:40	1.574288	1.338725	17.523	1.287087E-03	1.655847E-04	1.297695E-03	7.405684E-05
87	76092F	58346.924279102	0.063546605	1.20527254	16.08.2018	22:10:57	1.647775	1.347979	17.511	1.282602E-03	1.615186E-04	1.292732E-03	7.382239E-05
88	76092F	58346.924482440	0.065316717	1.21270705	16.08.2018	22:11:15	1.721530	1.357520	17.568	1.287262E-03	1.665097E-04	1.297986E-03	7.388186E-05
89	76092F	58346.924685236	0.071081501	1.22005624	16.08.2018	22:11:32	1.795063	1.366823	17.522	1.283387E-03	1.623733E-04	1.293618E-03	7.383001E-05
90	76092F	58346.955212679	0.513928928	2.37250700	16.08.2018	22:55:30	12.913705	2.623631	2637.571	1.940569E-01	2.193543E-02	1.952927E-01	7.404264E-05
91	76092F	58346.955391981	0.515499447	2.37480537	16.08.2018	22:55:45	12.979144	2.630015	15.492	1.142114E-03	1.114281E-04	1.147536E-03	7.407431E-05
92	76092F	58346.955573848	0.521095069	2.38113865	16.08.2018	22:56:01	13.045628	2.636496	15.713	1.160369E-03	1.131206E-04	1.165870E-03	7.419633E-05
93	76092F	58346.955753348	0.522667076	2.38343198	16.08.2018	22:56:17	13.111128	2.642867	15.509	1.143196E-03	1.111838E-04	1.148590E-03	7.406052E-05
94	76092F	58346.955935029	0.524262985	2.38574907	16.08.2018	22:56:32	13.177624	2.649303	15.697	1.160578E-03	1.123357E-04	1.166002E-03	7.428069E-05
95	76092F	58346.956115279	0.525844399	2.39207408	16.08.2018	22:56:48	13.243517	2.655761	15.574	1.150037E-03	1.127197E-04	1.155548E-03	7.419913E-05
96	76092F	58346.956294614	0.531422886	2.39433609	16.08.2018	22:57:03	13.309287	2.662045	15.495	1.147908E-03	1.096653E-04	1.153135E-03	7.442198E-05

C. Berechnung der Inklination des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 68081G

Bestimmung der Kugelkoordinaten

Objekt	68081G	Datenpunkt 38	Objekt	68081G	Datenpunkt 91
	Radius	$r' = 1$ (m)		Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 95.66822258$ (°)		Polarwinkel	$\theta' = 91.25970253$ (°)
	Azimuthwinkel	$\varphi' = 328.1264286$ (°)		Azimuthwinkel	$\varphi' = 36.08467354$ (°)
Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)	Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 90$ (°)		Polarwinkel	$\theta' = 90$ (°)
	Azimuthwinkel	$\varphi' = 0$ (°)		Azimuthwinkel	$\varphi' = 90$ (°)

Umrechnung Winkel

Objekt	Radius	$r' = 1$ (m)	Objekt	Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 1.669725474$ (rad)		Polarwinkel	$\theta' = 1.592782284$ (rad)
	Azimuthwinkel	$\varphi' = 5.726886542$ (rad)		Azimuthwinkel	$\varphi' = 0.629796363$ (rad)
Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)	Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 1.570796327$ (rad)		Polarwinkel	$\theta' = 1.570796327$ (rad)
	Azimuthwinkel	$\varphi' = 0$ (rad)		Azimuthwinkel	$\varphi' = 1.570796327$ (rad)

Umrechnung im kartesischen Koordinaten

Objekt	x	a1	0.845063111	Objekt	x	b1	0.807952149
	y <td>a2 <td>-0.525464794</td> <td></td> <td>y <td>b2 <td>0.588837856</td> </td></td></td>	a2 <td>-0.525464794</td> <td></td> <td>y <td>b2 <td>0.588837856</td> </td></td>	-0.525464794		y <td>b2 <td>0.588837856</td> </td>	b2 <td>0.588837856</td>	0.588837856
	z <td>a3 <td>-0.098767856</td> <td></td> <td>z <td>b3 <td>-0.021984185</td> </td></td></td>	a3 <td>-0.098767856</td> <td></td> <td>z <td>b3 <td>-0.021984185</td> </td></td>	-0.098767856		z <td>b3 <td>-0.021984185</td> </td>	b3 <td>-0.021984185</td>	-0.021984185
Äquator	x <td>a1 <td>1</td> <td>Äquator</td> <td>x <td>b1 <td>6.12574E-17</td> </td></td></td>	a1 <td>1</td> <td>Äquator</td> <td>x <td>b1 <td>6.12574E-17</td> </td></td>	1	Äquator	x <td>b1 <td>6.12574E-17</td> </td>	b1 <td>6.12574E-17</td>	6.12574E-17
	y <td>a2 <td>0</td> <td></td> <td>y <td>b2 <td>1</td> </td></td></td>	a2 <td>0</td> <td></td> <td>y <td>b2 <td>1</td> </td></td>	0		y <td>b2 <td>1</td> </td>	b2 <td>1</td>	1
	z <td>a3 <td>6.12574E-17</td> <td></td> <td>z <td>b3 <td>6.12574E-17</td> </td></td></td>	a3 <td>6.12574E-17</td> <td></td> <td>z <td>b3 <td>6.12574E-17</td> </td></td>	6.12574E-17		z <td>b3 <td>6.12574E-17</td> </td>	b3 <td>6.12574E-17</td>	6.12574E-17

Vektorprodukt

Objekt	x	a4	0.069710168 x
	y <th>a5</th> <td>-0.061221678 y</td>	a5	-0.061221678 y
	z <th>a6</th> <td>0.922155559 z</td>	a6	0.922155559 z
Äquator	x <th>b4</th> <td>-6.12574E-17 x</td>	b4	-6.12574E-17 x
	y <th>b5</th> <td>-6.12574E-17 y</td>	b5	-6.12574E-17 y
	z <th>b6</th> <td>1 z</td>	b6	1 z

Skalarprodukt

Cos. Inkl.	cos i	0.994977014
Inklination	i	0.100271598 (rad)
Inklination	i	5.745139376 (°)

D. Berechnung der Inklination des Objekts mit der COSPAR-Bezeichnung 76092F

Bestimmung der Kugelkoordinaten

Objekt	76092F	Datenpunkt 51	Objekt	76092F	Datenpunkt 26
	Radius	$r' = 1$ (m)		Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 92.92932864$ (°)		Polarwinkel	$\theta' = 88.61010319$ (°)
	Azimutwinkel	$\varphi' = 334.28030171$ (°)		Azimutwinkel	$\varphi' = 1.97742717$ (°)
Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)	Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 90$ (°)		Polarwinkel	$\theta' = 90$ (°)
	Azimutwinkel	$\varphi' = 0$ (°)		Azimutwinkel	$\varphi' = 90$ (°)

Umrechnung Winkel

Objekt	Radius	$r' = 1$ (m)	Objekt	Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 1.621922756$ (rad)		Polarwinkel	$\theta' = 1.546538051$ (rad)
	Azimutwinkel	$\varphi' = 5.834291889$ (rad)		Azimutwinkel	$\varphi' = 0.034512615$ (rad)
Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)	Äquator	Radius	$r' = 1$ (m)
	Polarwinkel	$\theta' = 1.570796327$ (rad)		Polarwinkel	$\theta' = 1.570796327$ (rad)
	Azimutwinkel	$\varphi' = 0$ (rad)		Azimutwinkel	$\varphi' = 1.570796327$ (rad)

Umrechnung im kartesischen Koordinaten

Objekt	x	a1	0.89975066	Objekt	x	b1	0.999110456
	y <th>a2</th> <td>-0.433401795</td> <td></td> <td>y <th>b2</th> <td>0.034495612</td> </td>	a2	-0.433401795		y <th>b2</th> <td>0.034495612</td>	b2	0.034495612
	z <th>a3</th> <td>-0.051104159</td> <td></td> <td>z <th>b3</th> <td>0.024255896</td> </td>	a3	-0.051104159		z <th>b3</th> <td>0.024255896</td>	b3	0.024255896
Äquator	x <th>a1</th> <td>1</td> <td>Äquator</td> <td>x <th>b1</th> <td>6.12574E-17</td> </td>	a1	1	Äquator	x <th>b1</th> <td>6.12574E-17</td>	b1	6.12574E-17
	y <th>a2</th> <td>0</td> <td></td> <td>y <th>b2</th> <td>1</td> </td>	a2	0		y <th>b2</th> <td>1</td>	b2	1
	z <th>a3</th> <td>6.12574E-17</td> <td></td> <td>z <th>b3</th> <td>6.12574E-17</td> </td>	a3	6.12574E-17		z <th>b3</th> <td>6.12574E-17</td>	b3	6.12574E-17

Vektorprodukt

Objekt	x	a4	-0.00874968 x
	y	a5	-0.072882959 y
	z	a6	0.464053714 z
Äquator	x	b4	-6.12574E-17 x
	y	b5	-6.12574E-17 y
	z	b6	1 z

Skalarprodukt

Cos. Inkl.	cos i	0.987718776
Inklination	i	0.156884956 (rad)
Inklination	i	8.988845871 (°)