

Hochschule Neubrandenburg

3D-Visualisierung der Elektronendichte der Ionosphäre und Plasmasphäre

mittels der MATLAB Google Earth-Toolbox

Bachelorarbeit

im Studiengang Geoinformatik

zum Erlangen des akademischen Grades
“**Bachelor of Engineering**“ (B.Eng.)

eingereicht von:
Sebastian Besch



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences



Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. A. Wehrenpfennig
Zweitprüfer: Dr. T. Gerzen

Bearbeitungszeitraum: 04.07.2011 - 29.08.2011

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2011-0536-6

Kurzfassung

Im Rahmen der Bachelorarbeit sollen zwei verschiedene Ansätze zur 3D Darstellung der rekonstruierten Schichten der Elektronendichte mithilfe der Funktionen der Google Earth-Toolbox getestet werden. Zum einen der Ansatz, der die Elektronendichtedarstellung mittels Variation von Farbtönen, Transparenzwerten und Lichteffekten der übereinander gelagerten Elektronendichteschichten realisiert. Zum anderen der Ansatz, der die Darstellung der Schwankung der Dichte durch die Veränderung der Farbtöne und Transparenzwerten in den einzelnen Voxel realisiert. Anschließend sollen die Ansätze in MATLAB softwaretechnisch umgesetzt werden. Die Software soll auf operationelle Lauffähigkeit getestet werden. Die Bachelorarbeit soll eine Kurzdokumentation der entwickelten Software enthalten.

Abstract

As part of the bachelor's thesis, two different approaches to 3D representation of the reconstructed sections of the electron density using the features of Google Earth toolbox will be tested. First, the approach that the representation of the electron density is realized by varying shades of color, transparency values and light effects of superimposed layers of electron density. Second, the approach that the representation of the variation in density is realized by changing the colors and transparency in each voxel. After this, the approaches are implemented in MATLAB software technology. The software will be tested on operability. The bachelor's thesis should contain a short documentation of the developed software.

Vorwort

Die Darstellung von Themen verschiedener Herkunft sind gegenwärtig ein selbstverständlicher Prozess, Sachverhalte zu kommunizieren. Das Interesse, die Erde anschaulich zu erkunden und zu untersuchen, nimmt nicht nur aufgrund des Klimawandels und des gesteigerten Umweltbewusstseins stetig zu, sondern ist heute im Rahmen der Globalisierung umso wichtiger für die Allgemeinbildung.

Ein Anwendungsgebiet, bei dem diese Prozesse eine Rolle spielen, ist die Navigation, die der Öffentlichkeit unter GPS-Navigationssysteme bekannt ist. Um zu begutachten, wie diese Vorgänge vonstatten gehen, ist eine einprägsame Modellierung ratsam, die im vorliegenden Dokument behandelt wird.

Ich möchte mich bei allen Personen im meinem Umfeld bedanken, die mich bei der Erstellung dieses Dokuments mit Ratschlägen, Korrekturen und Fachwissen geholfen haben. Insbesondere möchte ich meinen Eltern und Großeltern für die umfassende Unterstützung herzlich danken. Dank gebührt dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Neustrelitz, das die Umgebung für das wissenschaftliche Arbeiten bereitgestellt und notwendiges Fachwissen vermittelt hat.

Neubrandenburg, 29. August 2011

Sebastian Besch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Intention der Arbeit	2
1.2	Struktur der Arbeit	2
2	Grundlagen	3
2.1	Grundlagen der Ionosphären- und Plasmasphärenforschung	3
2.2	Anwendungsbereiche der Ionosphären- und Plasmasphärenforschung . .	5
2.3	Algorithmus zur Rekonstruktion der Elektronendichte	6
2.4	Visualisierung der Elektronendichte	7
2.5	Grundlagen der Google Earth-Toolbox für MATLAB	9
3	Konzeption	10
3.1	Struktur der rekonstruierten Elektronendichte	10
3.2	Visualisierte Elektronendichte als Ebenenschar	12
3.3	Visualisierte Elektronendichte als Voxelmenge	14
3.4	Gewährleistung der Operationalität	16
4	Umsetzung	20
4.1	Realisierung der Komponenten	20
4.1.1	Integration der Eingabedaten	20
4.1.2	Umsetzung der Interpolation und Transparenz	22
4.1.3	Generierung der Ebenen	24
4.1.4	Generierung der Voxelmenge	27
4.1.5	Erzeugung des operationellen Produkts	32
4.2	Ergebnisse	36
4.3	Auswertung	40
5	Zusammenfassung und Ausblick	43
	Anhang	45
A	Google Earth: Visualisierungen	45

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Differenzierung der Wellenlänge	4
Abb. 2	Schema der Elektronendichteverteilung der Ionosphäre	4
Abb. 3	Szintillationsdichte	6
Abb. 4	Rekonstruktion der maximalen Elektronendichte der F2- Schicht .	7
Abb. 5	Ebenendarstellung der Elektronendichteverteilung	8
Abb. 6	Voxeldarstellungen	8
Abb. 7	Auszug der dreidimensionale Matrix in MATLAB	10
Abb. 8	Schema des Schichtenprinzips der Ebenen	12
Abb. 9	Schema des visualisierten Volumens der Ebenenschar	12
Abb. 10	Kubisches Gitter	15
Abb. 11	Umwandlung der konstruierte Würfel in Trapezprismen	15
Abb. 12	Informationen der RGB-Bildmatrizen	22
Abb. 13	Schattierungsmethoden der Oberflächen	25
Abb. 14	Analyse der Nachbarschaft der Bildelemente	28
Abb. 15	Körperhöhe des Voxels	29
Abb. 16	Interpolation der rudimentären Matrix	36
Abb. 17	Transparenzverteilung der Bildmatrizen	37
Abb. 18	Visualisierung der Lichteffekte	38
Abb. 19	Voxelkonstruktion	38
Abb. 20	Darstellung der modifizierten Voxelmenge	39
Abb. 21	Bestandteile des operationellen Betriebs	39
Abb. 22	Flugroute zwischen Satelliten und Erde	44
Abb. 23	Schichten in Google Earth (kleiner Maßstab)	45
Abb. 24	Schichten in Google Earth (mittlerer Maßstab)	46
Abb. 25	Voxelmenge in Google Earth (kleiner Maßstab)	47
Abb. 26	Voxelmenge in Google Earth (mittlerer Maßstab)	48
Abb. 27	Voxelmenge in Google Earth (hoher Maßstab)	49
Abb. 28	Integration des operationellen Produkts als Online-Gadget	50

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Visualisierungsmöglichkeiten der Google Earth-Toolbox	9
Tab. 2	Vor- und Nachteile des Ebenenkonzepts	13
Tab. 3	Vor- und Nachteile des Voxelprinzips	16
Tab. 4	Charakteristik der Visualisierungsprodukte	41
Tab. 5	Anwendungen der Visualisierungsprodukte	42

Diagrammverzeichnis

Diagr. 1	UML-Sequenzdiagramm der verarbeiteten Bildmatrizen	11
Diagr. 2	UML-Komponentendiagramm der realisierten Ebenen	13
Diagr. 3	UML-Komponentendiagramm der realisierten Voxel	16
Diagr. 4	UML-Komponentendiagramm des operationellen Produkts	17
Diagr. 5	UML-Sequenzdiagramm des operationellen Produkts	19
Diagr. 6	UML-Anwendungsfalldiagramm des operationellen Systems	19
Diagr. 7	Mindmap der Integration der Eingabedaten	21
Diagr. 8	Mindmap der realisierten Verarbeitung der Visualisierung	24
Diagr. 9	Mindmap der verarbeiteten Ebenen	27
Diagr. 10	Mindmap der verarbeiteten Voxelmenge	32
Diagr. 11	Mindmap des realisierten operationellen Produkts	34
Diagr. 12	UML-Aktivitätsdiagramm des operationellen Produkts	35

Formelverzeichnis

(2.1)	Gleichung des Gesamtelektronengehalts	6
(2.2)	Gleichung zur Elektronendichte der maximalen Ionisierung	6
(3.1)	Gleichung der Flächenhöhen	14
(3.2)	Gleichung zur Konstruktion der Flächen	14
(4.1)	Gleichung der Transparenzberechnung	23
(4.2)	Gleichung der hexadezimalen Transparenzberechnung	23
(4.3)	Modifikation der Transparenz der Ebenen	25
(4.4)	Länge der Voxel nach λ	27
(4.5)	Breite der Voxel nach ϕ	27
(4.6)	Modifikation der Transparenz der Voxel	29
(4.7)	Geometrie der ersten Seitenfläche eines Voxels	30

Abkürzungsverzeichnis

DIMS	<u>D</u> aten- und <u>I</u> nformations <u>m</u> anagement <u>S</u> ystem	18
DLR	<u>D</u> eutsches <u>Z</u> entrum für <u>L</u> uft- und <u>R</u> aumfahrt	II
GNSS	<u>G</u> lobal <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite <u>S</u> ystem	5
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem	II
KML	<u>K</u> eyhole <u>M</u> arkup <u>L</u> anguage	26
KMZ	<u>K</u> eyhole <u>M</u> arkup <u>Z</u> ip	34
MAT	<u>M</u> atrix	21
MATLAB	<u>M</u> atrix <u>L</u> aboratory	I
NEDM	<u>N</u> eustrelitz <u>E</u> lectron <u>D</u> ensity <u>M</u> odel	7
PNG	<u>P</u> ortable <u>N</u> etwork <u>G</u> raphics	26
PSM	<u>P</u> rocessing <u>S</u> ystem <u>M</u> anagement	18
RGB	<u>R</u> ed <u>G</u> reen <u>B</u> lue	22
SI	<u>S</u> ystème <u>I</u> nternational d'unités	11
SWACI	<u>S</u> pace <u>W</u> eather <u>A</u> pplication <u>C</u> enter- <u>I</u> onosphere	16
TEC	<u>T</u> otal <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent	5
UML	<u>U</u> nified <u>M</u> odeling <u>L</u> anguage	11
WGS84	<u>W</u> orld <u>G</u> eodetic <u>S</u> ystem 1984	15
XML	<u>E</u> xtensible <u>M</u> arkup <u>L</u> anguage	20
ZIP	<u>Z</u> ipper	34

Kapitel 1

Einleitung

In vielen Bereichen der Gesellschaft sind Darstellungen zur Veranschaulichung von Themenkomplexen notwendig. Neben bedeutenden Fachbereichen der Medizin, Architektur und Wirtschaft, hat die Visualisierung in der Wissenschaft einen hohen Stellenwert.

Hierbei werden Daten, die vorwiegend chemischen und physikalischen Ursprungs sind, mit hoher Aussagekraft dargestellt. Komplexe Vorgänge der Naturwissenschaften können mithilfe von Abbildungen, Modellen oder Simulationen prägnant, einfach und rasch verstanden und vermittelt werden. Die Visualisierungen haben demnach eine lange Tradition im wissenschaftlichen Kontext, um Fachwissen einprägsam vorzustellen.

Diese Darstellungen sind stetig im Wandel. War es vor Jahrzehnten üblich, überladene und den Rezipienten überfordernde Abbildungen oder Diagramme anzubieten, gibt es heute eine rege Forschung, die die Wissensvermittlung mittels Veranschaulichung verbessert und erweitert (FRIENDLY, 2009, S. 34-35). Ein Forschungsbereich ist die Fragmentierung komplexer Gegebenheiten in Teilaspekte, die dargestellt werden. Hierbei werden Darstellungen entwickelt, die trotz eventuell komprimiertem Inhalt naheliegend sind.

Verschiedene Institute und Arbeitsgruppen der Natur- und Geowissenschaften beschäftigen sich mit Erweiterungen von Visualisierungen, die ihre Forschungsschwerpunkte näher bringen. Ein Forschungszweig in diesem Kontext ist die Untersuchung der Ionosphäre und Plasmaphäre und den damit verbundenen Zusammenhängen. Jener Themenkomplex ist eine umfassende und anspruchsvolle Thematik, deren interne Vorgänge und Beziehungen ohne Darstellungen diffizil sind. Das DLR Neustrelitz widmet sich diesem Thema sehr intensiv in Deutschland.

Ein Teilaspekt jener Thematik ist die Untersuchung der Elektronendichte, die durch Visualisierungen im Umfeld der Erde den Fachleuten aus anderen wissenschaftlichen Disziplinen oder Quereinsteigern näher gebracht werden können. Eine wichtige Rolle spielen hierbei darstellende Simulationen mittels der Software Google Earth, die die Navigation im Umfeld der Erde ermöglicht.

1.1 Intention der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Konzepten der Visualisierungen der Elektronendichte in Google Earth, die mittels der Software MATLAB¹ erzeugt werden. Bewährte Darstellungskonzepte der Elektronendichte werden durch diese Arbeit um Dreidimensionalität erweitert. Diese Arbeit vermittelt einen Entwurf und die Umsetzung dreidimensionaler Visualisierungsprodukte, die der Anwender mittels der Navigationselementen Google Earths begutachten kann. Die Ausführungen spezifizieren demnach eine mögliche Schnittstelle zwischen Forschungs- und Öffentlichkeitsarbeit.

1.2 Struktur der Arbeit

Zunächst werden im Kapitel 2 die Grundlagen dieses Forschungszweigs vorgestellt, um einen Einblick in die Charakteristik und Entstehung des Datenmaterials zu erhalten. Nach der Einführung in das fundamentale Fachwissen der Ionosphäre und Plasmasphäre werden anschließend vorgestellte Anwendungen hinsichtlich praktischer Relevanz untersucht. Erläuterungen zur Berechnung der Rekonstruktion der Elektronendichte werden im Wesentlichen wiedergegeben, um die Herkunft der Datengrundlage zu erklären. Daraufaufgehend werden bereits entwickelte Visualisierungen der Elektronendichte vorgestellt, um den aktuellen Kenntnisstand anzusprechen. Im letzten Abschnitt werden die wesentlichen Schnittstellen der MATLAB Google Earth-Toolbox genannt und erklärt, um einen Überblick der Verarbeitung der Visualisierungsprodukte zu erhalten.

Die Entwürfe der Erzeugung der Visualisierungsprodukte werden im Kapitel 3 gezeigt und erläutert, um das Verarbeitungssystem zu verstehen und einen Leitfaden für potenzielle Pläne für Visualisierungen zu erstellen. Überdies werden Konzepte einer geplanten Operationalität erläutert, um eine Konzeption für nachhaltige Nutzung jener Visualisierungsprodukte zu erhalten.

Im Kapitel 4 werden die konkreten Lösungsschritte der Realisierung der Entwürfe detailliert nachvollzogen, so dass die Machbarkeit und Plausibilität der Konzeption aufgezeigt wird. Neben den Umsetzungen der vorgestellten Programmkomponenten der Entwürfe werden die Systemscharakteristika Google Earths marginal geschildert, um den Kontext mit dieser Software zu wahren. Anschließend werden zur Demonstration die Zwischenergebnisse der Verarbeitung illustriert, erläutert und ausgewertet.

Im letzten Kapitel wird ein Resümee ausgehend von der Aufgabenstellung gezogen sowie mögliche Erweiterungen und zukünftige Projekte der Visualisierung besprochen.

¹Umgebung für technische Verarbeitung und höhere Programmiersprache (MATLAB, 2007)

Kapitel 2

Grundlagen

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Betrachtung des grundlegenden Wissensstands der Ionosphäre und Plasmasphäre. Ebenso wichtig sind die Ausführungen zur Rekonstruktion und Darstellung der Elektronendichte. Die Veranschaulichungen der Visualisierungsmöglichkeiten der Google Earth Toolbox für MATLAB sind für das Verständnis der Implementierungslösungen erforderlich.

2.1 Grundlagen der Ionosphären- und Plasmasphärenforschung

In diesem Abschnitt soll eine Einführung in die Forschung der Ionosphäre und Plasmasphäre gegeben werden, die auf Literatur von RATCLIFF (1974) und BAUER (1994) basiert.

Die Erdatmosphäre ist nach Kriterien wie Temperatur, Ionisation² und Gaszusammensetzungen in Unterabschnitte zu differenzieren. Von dieser Aufgabenstellung ausgehend, ist eine simplifizierte Einteilung in Troposphäre, Ionosphäre und Plasmasphäre möglich. Die Troposphäre reicht von der Erdoberfläche bis zu rund 50 km Höhe. Der anschließende Bereich bis 1000 km Höhe ist die Ionosphäre. Die darüberliegende Schicht stellt die Plasmasphäre dar.

Der Begriff Ionosphäre deutet darauf hin, dass es sich um eine Schicht handelt, die ionisiert ist. Diese Ionisation bewirkt, dass deren Gasmoleküle in hohem Maße mit elektrischer Ladung versehen werden. Diese ist je nach Wellenlänge in verschiedenen Höhen unterschiedlich (siehe Abb. 1).

²Ionisation bedeutet hier die Bildung der Elektronen durch Sonnenstrahlung

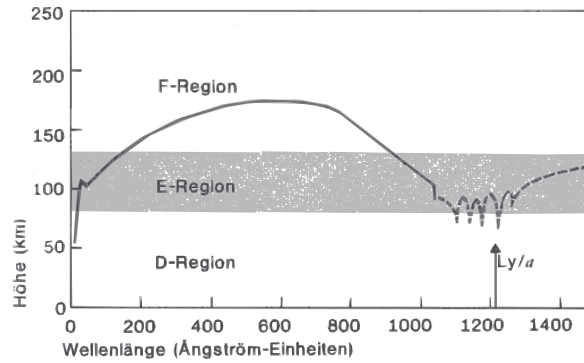


Abbildung 1: Differenzierung der Wellenlänge nach RATCLIFF (1974).

Die Abstufung der Ionosphäre nach der Elektronenanzahl pro m^3 in den Unterschichten D-, E- und F-Schicht ist somit vorzunehmen. Da die Elektronenladung von der Strahlung und somit der Tageszeit abhängig ist, wurde eine Differenzierung der F-Schicht (F1 und F2) gefasst. Neuere Untersuchungen zeigen, dass diese Schichten nicht voneinander trennbar sind (KUNITSYN und TERESHCHENKO, 2003, S. 5). Die Gesamtstruktur der Elektronendichte wird durch die Elektronendichteverteilung N_e (siehe Abb. 2) beschrieben.

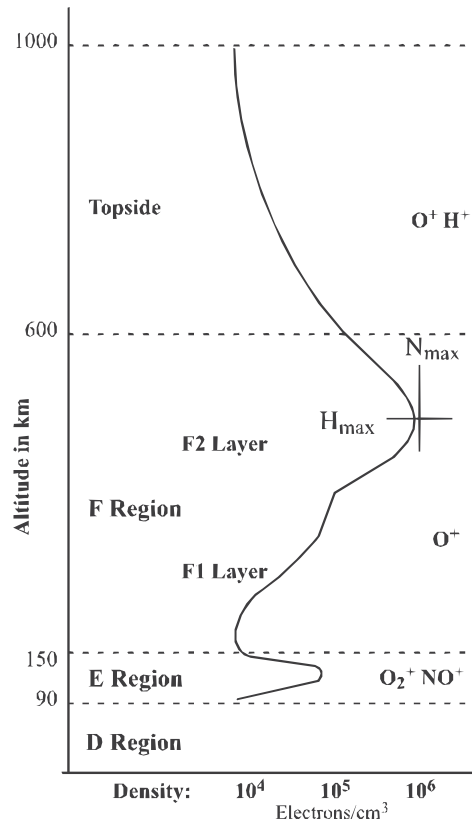


Abbildung 2: Schema der Elektronendichteverteilung der Ionosphäre nach ANDERSON und FULLER-ROWELL (1999).

Das Maximum der Elektronendichteverteilung mit bis zu 10^{12} m^{-3} befindet sich unter

normalen Bedingungen in der F-Schicht, die in 150-600 km Höhe verläuft, während die D-Schicht in 50-90 km Höhe mit bis zu 10^4 m^{-3} am geringsten ionisiert ist. Bei großen Sonnenaktivitäten, bspw. einer Sonneneruption, entsteht eine deutliche Variation der Ionisierung, die als Szintillationen die Ionosphäre beeinflussen. Diese Störungen haben Einfluss auf die Laufzeit elektromagnetischer Signale (BAUER, 1994, S. 103-104).

Die Ionosphäre ab 1000 km Höhe geht mit Abnahme der Elektronenkonzentration in die Plasmasphäre über. Dieser ferner als Protonosphäre bezeichnete torusförmige Bereich weist geschlossene, weitgehend dipolare Magnetfeldlinien auf (SCHUNK und NAGY, 2009, S. 359) und ist somit Bestandteil der Magnetosphäre. Diese Schicht stellt den inneren Teil der Magnetosphäre dar, der noch eine signifikante Menge an Elektronen aufweist (10^9 m^{-3}). Der Übergang der inneren zur äußeren Magnetosphäre wird als Plasmopause bezeichnet. In diesem Bereich findet ein verhältnismäßig scharfer Abfall der Elektronenkonzentration statt. Die äußere Magnetosphäre weist mit 1 m^{-3} eine sehr geringe Elektronendichte auf (RATCLIFF, 1974, S. 242-243). Die durch Sonneneruption verursachten Sonnenwinde beeinflussen die Plasmasphäre und die Lage der Plasmopause. Hierbei findet eine Abgabe von Elektronen der Plasmasphäre in die äußere Magnetosphäre statt. Jene Elektronen sind insbesondere ionosphärischen Ursprungs. Sie gelangen durch den Plasmadruck und durch das magnetische und elektrische Feld in die Plasmasphäre (HEISE, 2002, S. 19-20). Diese Auswirkungen auf die ionisierte Plasmasphäre sind bei den nun vorgestellten praktischen Anwendungen zu berücksichtigen.

2.2 Anwendungsbereiche der Ionosphären- und Plasmasphärenforschung

Die Erkenntnisse der Ionosphärenforschung werden mitunter zur Verbesserung der Genauigkeit der GNSS basierten Navigation und Positionsbestimmung verwendet. Hierbei wird zwischen der Erfassung der ionosphärischen Störungen und den Methoden der Korrektur unterschieden. Ersteres hat die Aufgabe, die Ionosphäre durch Messungen zu überwachen und Störungen (Szintillationen) zu untersuchen (siehe Abb. 3). Im Letzteren werden Methoden zur Ableitung ionosphärischer Korrekturen entwickelt, Bewertungen zum Ionosphärenzustand wie der Elektronendichte vorgenommen und Korrektur- und Vorhersagemodelle entworfen (JAKOWSKI, 2011).

Die Ergebnisse der Forschung der Plasmasphäre sind vor allem bei der Ermittlung der Elektronendichte bedeutend. Die plasmasphärischen Beobachtungen der Elektronenkonzentration werden bei der Ableitung integraler Elektronendichteinformationen (TEC), die für globale Navigationssysteme wichtig sind (HEISE, 2002, S. 21), benötigt.

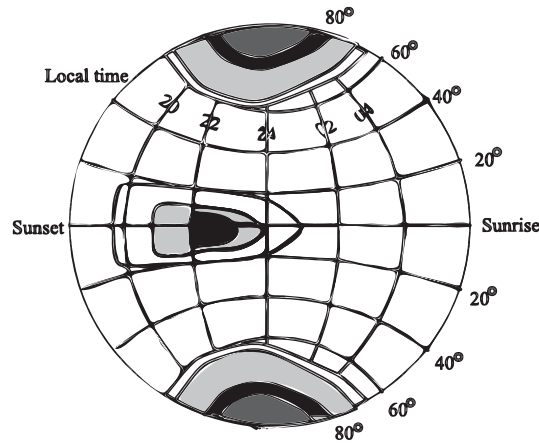


Abbildung 3: Szintillationsdichte nach ANDERSON und FULLER-ROWELL (1999).

2.3 Algorithmus zur Rekonstruktion der Elektronendichte

Grundlegend für die Rekonstruktion der Elektronendichte sind die Messungen des Gesamtelektronenangehalts (TEC). Der Zusammenhang zwischen Elektronendichte und dem vertikalen TEC ist durch folgende Formel 2.1 festgelegt:

$$TEC_v = \int_h N_{rec} dh. \quad (2.1)$$

TEC_v : vertikaler Gesamtelektronenangehalt;

N_{rec} : (aufgezeichnete) Elektronendichte;

h = Höhe;

Formel nach (GERZEN et al., 2011, S. 5).

Aus vorliegenden Beobachtungen der Ionosphäre ist die Elektronenkonzentration zu ermitteln. Diese Aufgabe ist ein inverses Problem, da die originären Messungen verwendet werden, um systemrelevante Parameter abzuleiten (TARANTOLA, 2005, S. 13). Spezielle Inversionsalgorithmen sind vorgesehen, um Informationen der Elektronendichteverteilung aus den TEC-Werten zu erhalten (HEISE, 2002, S. 25). Eine typische Charakteristik der Ionosphäre ist die maximale Elektronendichte der F2-Schicht nach der Formel 2.2:

$$NmF2_{rec} = N_{rec}(h_{mF2}). \quad (2.2)$$

$NmF2_{rec}$: maximale Elektronendichte der F2- Schicht;

h_{mF2} : Höhe der größten Ionisation der F2- Schicht;

Formel nach (GERZEN et al., 2011, S. 5).

Das im DLR Neustrelitz entwickelte Modell geht nach dem folgenden Schema vor. Die TEC-Daten werden durch Messungen der GNSS-Bodenstationen ermittelt. Aus denen werden mittels eines Assimilationsverfahrens TEC-Karten erstellt. Daraus werden die NmF2-Werte sowie die Werte der Elektronendichteverteilung mithilfe eines Elektronendichtemodells (NEDM-v1) und des in DLR Neustrelitz entwickelten NmF2-Modells rekonstruiert (GERZEN et al., 2011, S.1).

2.4 Visualisierung der Elektronendichte

Um einen deskriptiven Eindruck und Überblick der Verteilung der Elektronenkonzentration zu gewinnen, ist eine adäquate Darstellung erforderlich. Als anschaulichste Lösung hat sich die Veranschaulichung als farbige Konturen bewährt (siehe Abb. 4).

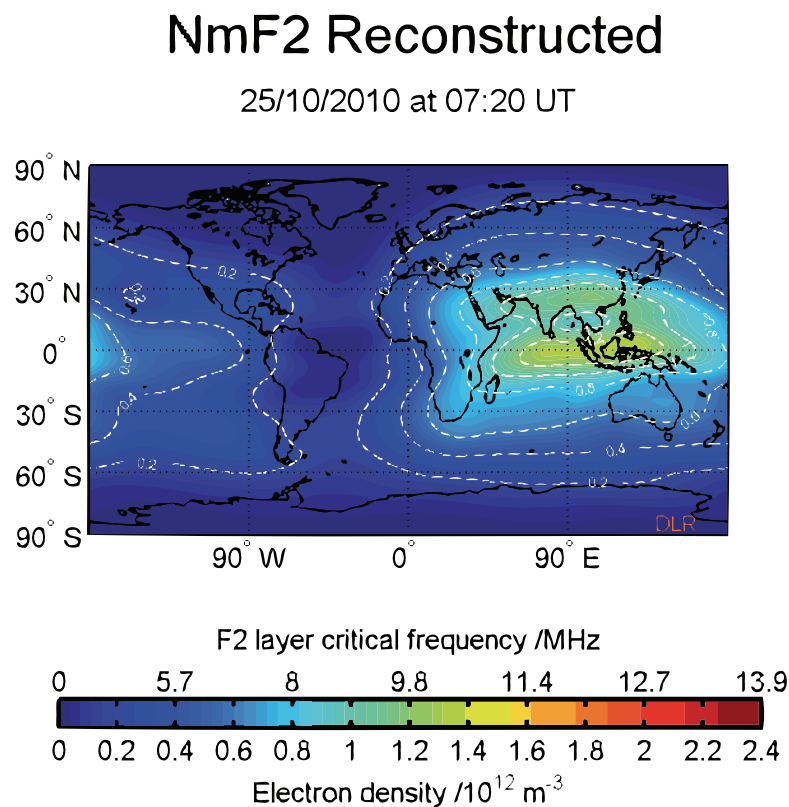


Abbildung 4: Rekonstruktion der maximalen Elektronendichte der F2-Schicht (NmF2) nach GERZEN (2010b).

Um einen Eindruck der Schichtung der Ionosphäre zu bekommen, werden die Informationen der Elektronendichte für jede Höhe invers abgeleitet (siehe Kap. 2.3) und als Konturen dargestellt, so dass die Elektronendichteverteilung als Ebenen wiedergegeben werden (siehe Abb. 5).

Die Variabilität der Elektronenkonzentration wird durch die unterschiedliche Ausprägung der Farbkonturen deutlich. Die veranschaulichte Spitze, die überdies als Crest bezeichnet wird, liegt bei 250-300 km Höhe in der F-Schicht, die unter normalen Bedingungen am ausgeprägtesten ionisiert ist (siehe Kap. 2.1).

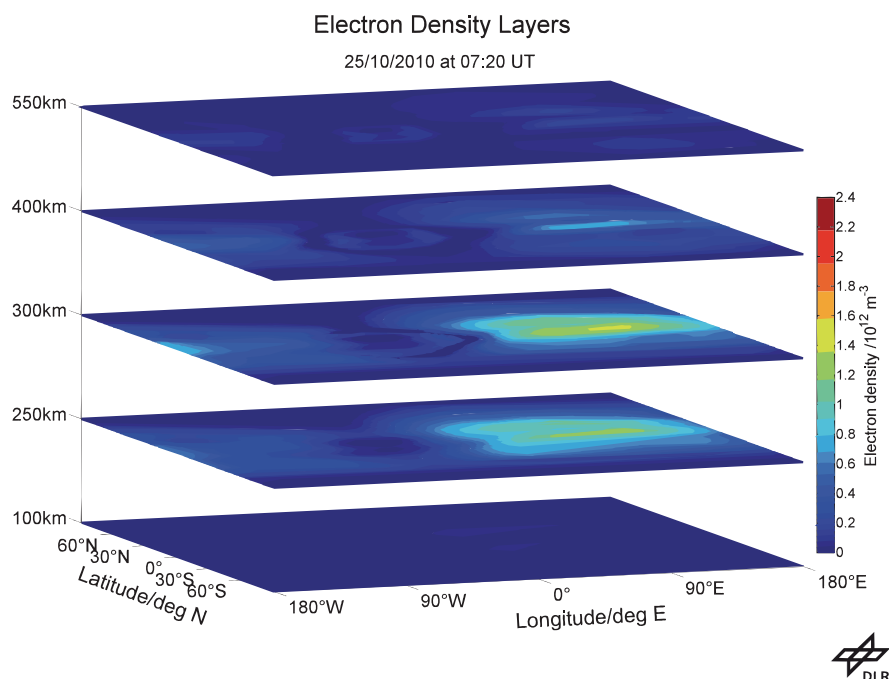


Abbildung 5: Ebenendarstellung der Elektronendichteverteilung nach GERZEN (2010a).

Es besteht zudem die Möglichkeit, die Ergebnisse der rekonstruierten Elektronendichte als dreidimensionale Objekte zu veranschaulichen. Die ferner als Voxel benannten Raumelemente werden durch eine Transformation der ursprünglichen geometrischen Darstellung als Ebenen in eine Voxelmenge erfasst. Dieser als Voxelisation bezeichnete Vorgang sieht eine Abtastung der originären Informationen vor, die mit Algorithmen der Rasterung der 2D-Elemente vergleichbar ist (KAUFMAN et al., 1993, S. 51). Darüber hinaus spielen die Nachbarschaftsbeziehungen der Voxel eine bedeutende Rolle, um eine ansprechende Visualisierung zu gewährleisten (siehe Abb. 6). Irrelevante Voxel werden durch Berücksichtigung der Voxel in der Umgebung ausgeschlossen.

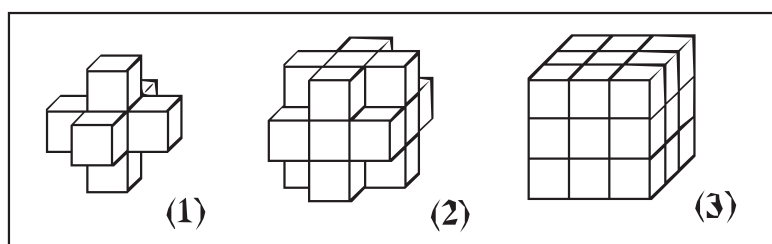


Abbildung 6: Voxeldarstellungen nach KAUFMAN et al. (1993).

2.5 Grundlagen der Google Earth-Toolbox für MATLAB

Die Google Earth-Toolbox ist eine von SPAAKS und DAVIS (2007b) an der Universität Amsterdam entwickelte Programm-bibliothek, die die Software MATLAB, die für numerische Probleme konzipiert ist, um bedeutende Visualisierungsmöglichkeiten in Google Earth erweitert. Die von MATLAB numerisch generierten räumlich und zeitlich verteilten Daten lassen sich mit Google Earth darstellen (SPAAKS und DAVIS, 2007b, S.1-2).

Der mannigfaltige Funktionsumfang jener Programm-bibliothek ermöglicht eine Lösung verschiedener Aufgabenbereiche der Visualisierung. Die Darstellungsmöglichkeiten der geometrischen Formen, Erzeugung der Bilder als Oberfläche und die Wiedergabe der Größen der beschreibenden Statistik erweisen sich als die herausragendsten Elemente der Google Earth Toolbox (siehe Tab. 1).

Google Earth Toolbox	Visualisierung
GE-Box	Rechteck auf Erdoberfläche
GE-Circle	Kreis auf Erdoberfläche
GE-Colorbar	Farblegende
GE-Contourf	gefüllte Kontur auf Erdoberfläche
GE-Cylinder	vertikaler Zylinder auf Erdoberfläche
GE-Imagesc	Visualisierung der Matrix im Raum (3D)
GE-Plot	Linie parallel zur Erdoberfläche
GE-Plot3	Linie im Raum (3D)
GE-Point	Punktelement auf Erdoberfläche
GE-Poly	Polygon parallel zur Erdoberfläche
GE-Poly3	Polygon im Raum (3D)
GE-Surf	Oberfläche im Raum (3D)
GE-Output	Quellcode des Visualisierungsprodukts

Tabelle 1: Visualisierungsmöglichkeiten der Google Earth-Toolbox nach SPAAKS und DAVIS (2007a).

Kapitel 3

Konzeption

Die Visualisierungsmodelle der Vorgänge der Ionosphäre und Plasmasphäre in Google Earth sind entscheidend für die Organisation der Implementierung des Visualisierungsprogramms. Ein fundierter Entwurf der Erzeugung der Visualisierungsprodukte stellt eine nachführende Softwareentwicklung der entwickelten Programmkomponenten sicher. Die Entwürfe unterschiedlicher Ebenen und einer Voxelmenge erweisen sich als veritable Darstellungen. Die Entwurfsbedingungen der operationellen Erzeugung der Visualisierungsprodukte sind für weiterführende Anwendungen bedeutsam.

3.1 Struktur der rekonstruierten Elektronendichte

Die Elektronenkonzentration wird auf Grundlage mathematischer Algorithmen (siehe Kap. 2.3) durch MATLAB numerisch rekonstruiert. Vordefinierte mathematische Funktionen dieser Software werden verwendet, um eine dreidimensionale Matrix mit Informationen der Elektronendichte zu erzeugen (siehe Abb. 7).

30.07.11 02:24		MATLAB Command Window							
Abtract_Matrix_3D =									
1.0e+010 *									
0.0097	0.0929	0.4284	1.1066	1.1146	0.9721	0.7939	0.6229	0.3623	
0.0097	0.0929	0.4284	1.1083	1.1194	0.9721	0.7939	0.6229	0.3623	
0.0097	0.0929	0.4284	1.1134	1.1238	0.9721	0.7939	0.6229	0.3623	
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	
Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene	Ebene
[Auszug der Elektronendichte (jeweils 3 Elemente pro Ebene)]									

Abbildung 7: Dreidimensionale Matrix in MATLAB.

Die erste und zweite Dimension der Matrix umfassen die Zuordnung der rekonstruierten Konzentrationen der Elektronen. Die geographische Verteilung der Elektronendichte ist durch deren Indizes gegeben. Die Anzahl der Elemente der Dimension gibt demnach Aufschluss über die räumliche Auflösung der Elektronendichteverteilung bzw.

Rekonstruktion. Die vorliegende Datengrundlage weist eine geringe Anzahl der Bildelemente (Pixel) für jede Dimension auf. Die enthaltenen Daten sind in der Einheit m^{-3} nach SI-Norm erfasst.

Die Elektronendichteverteilung wird durch die dritte Dimension der Matrix in der Höhe differenziert. Die Elektronendichteverteilungen unterschiedlicher Höhen werden durch Indizes zugeordnet. Die Elementenanzahl der dritten Matrixdimension gibt mit hin Auskunft über die Rasterung des Höhenprofils der Elektronenkonzentration. Die Höheninformationen liegen in einer zusätzliche Konfigurationsstruktur vor.

Das Resultat der Rekonstruktion wird durch einen externen MATLAB-Prozess hergestellt und als Datei persistent gemacht, so dass diese für andere Prozesse in MATLAB operationell verfügbar ist.

Die Daten werden aus der MAT-Datei eingelesen und als Matrix gespeichert. Um die Visualisierung zu glätten und somit optisch aufzuwerten, wird die eingelesene Matrix für jede Höhe auf eine höhere Pixelanzahl pro Dimension interpoliert bzw. skaliert³ und als Bildmatrizen mit farbigen Konturen gespeichert. Verschiedene Farbvarianten sind möglich. Eine abgestimmte Farbnorm ist für eine homogene Darstellung der implementierten Lichteffekte notwendig.

Zuletzt wird die erforderliche Transparenz der Bildelemente, basierend auf einer Gewichtung der Elektronendichte, berechnet und den Bildelementen zugeordnet. Der Kontrast der unterschiedlichen Elektronenkonzentration wird durch die heterogene Transparenz deutlich.

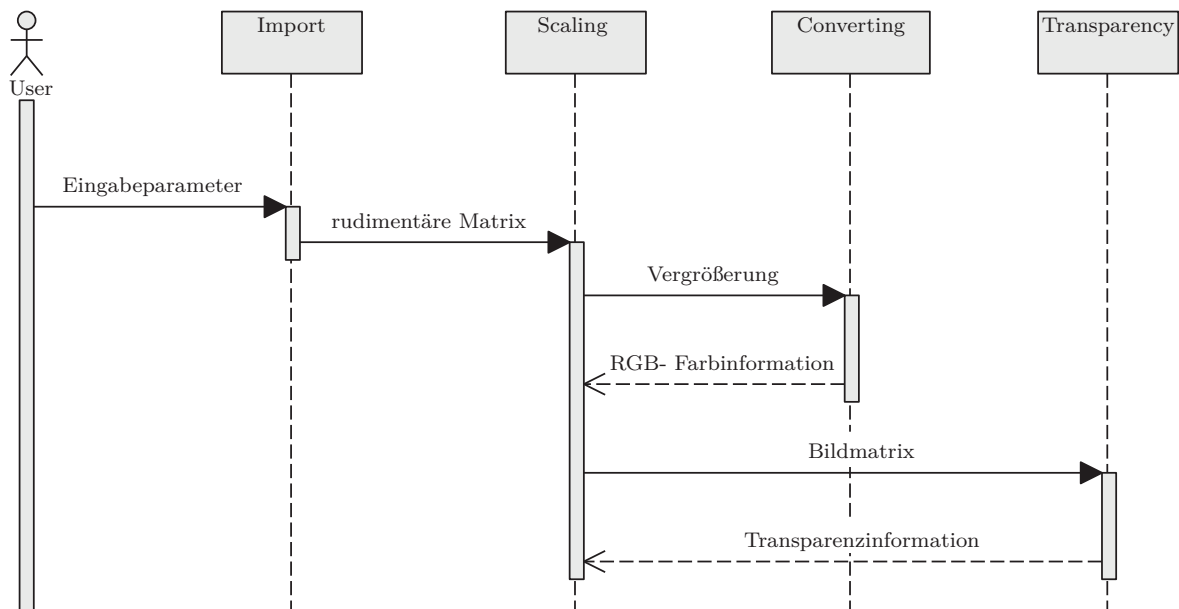


Diagramm 1: UML-Sequenzdiagramm der verarbeiteten Bildmatrizen.

³Skalierung bedeutet eine Anpassung bezüglich der Bildgröße.

3.2 Visualisierte Elektronendichte als Ebenenschar

Das Konzept der Ebenenschar sieht vor, die rekonstruierten Elektronendichteverteilung als Ebenen in Google Earth zu visualisieren. Die Daten der Elektronendichte werden in jeder Höhe als Bilder projiziert, so dass diese zusammen ein Ebenenschar ergeben. Die Ebenen werden gekoppelt mit der Höhe als übereinander gelegte Schichten dargestellt, um einen dreidimensionalen Eindruck zu gewinnen (siehe Abb. 8)

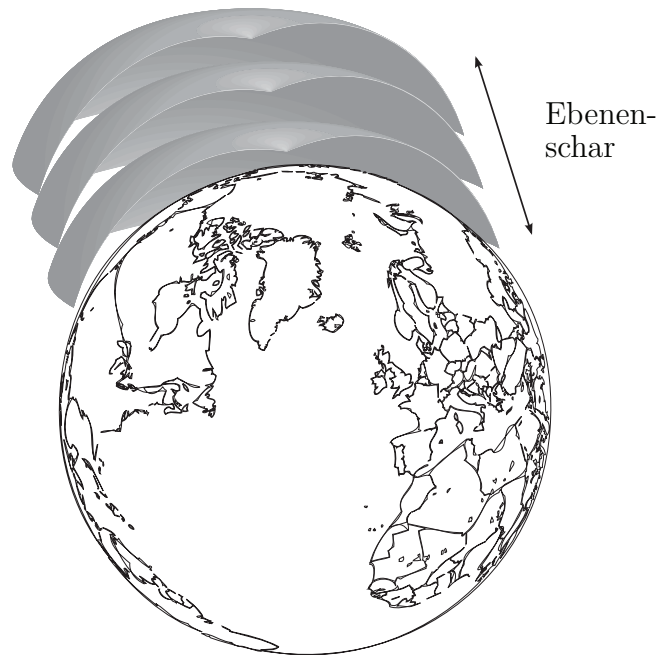


Abbildung 8: Schema des Schichtenprinzips der Ebenen.

Die Bilder werden oberhalb der gesamten Erdoberfläche gelegt, so dass ein Volumen der Elektronendichteverteilung der Ionosphäre visualisiert wird. Da die Zwischenräume der Ebenenschar unbesetzt bleiben, wird eine umfangreiche Matrix als Ausgangsdaten verwendet, so dass das verfeinerte Höhenprofil das verdichtete Volumen darstellt, welches in seiner dreidimensionalen Wirkung durch die unterschiedlichen Transparenzen (siehe Kap. 3.1) der Bildelemente zusätzlich verstärkt wird (siehe Abb. 9).

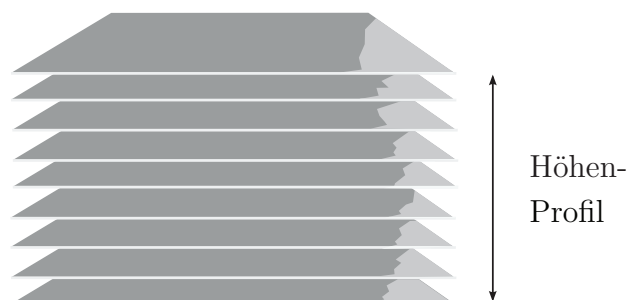


Abbildung 9: Schema des visualisierten Volumens der Ebenenschar.

Die im Vorfeld verarbeiteten Bildmatrizen werden den nachfolgend beschriebene Prozesskomponenten übergeben (siehe Diagr. 2).

Aufwendige Lichteffekte werden zur Intensivierung der dreidimensionalen Wirkung eingebracht. Dabei werden die Konturen der Ebenen mit der höchsten Elektronendichte ausgeleuchtet, farblich angepasst und mit Farbinformationen versehen.

Die realisierten Bildmatrizen werden in Ebenen umgewandelt, die für Google Earth konzipiert sind. Hierbei wird der Quellcode zur Konstruktion der Schichten und die für jede Ebene dazugehörigen Bilddateien erzeugt. Auf diese Weise entstehen Schichten in Google Earth, die die horizontale und vertikale Elektronendichteverteilung plastisch als Variante eines Cumulus visualisieren.

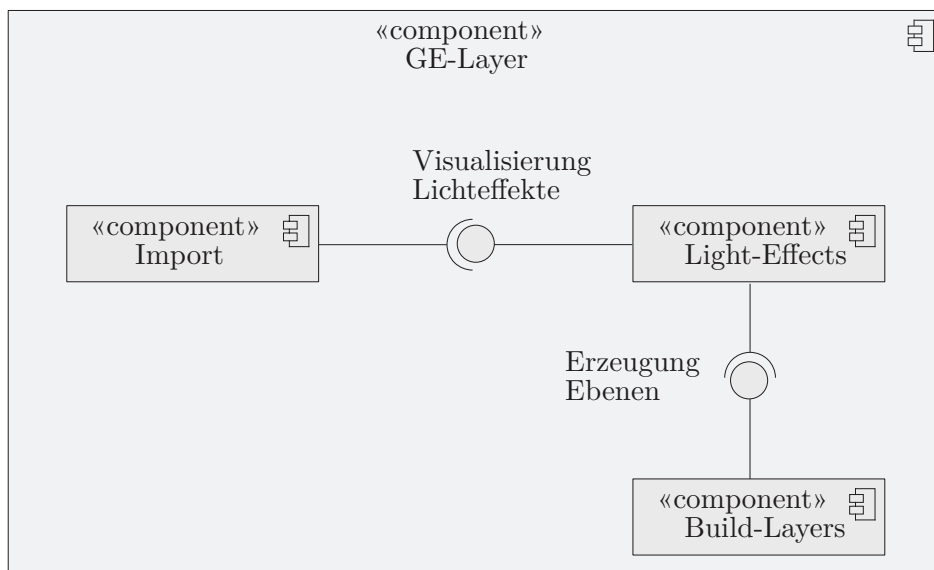


Diagramm 2: UML-Komponentendiagramm der realisierten Ebenen.

Das Ebenenkonzept bietet die Vorteile der einfacheren Handhabung und Performanz, stellt aber keine wahrhaftige Dreidimensionalität bereit. Die Interpolation der Bilder suggeriert einen größeren Umfang der Ausgangsdaten (siehe Tab. 2).

Vorteile	Nachteile
geringe Komplexität	Simulation der Dreidimensionalität
leichtes Verständnis	Skalierung gibt weitreichende Datengrundlage vor
hoher Detailgrad	

Tabelle 2: Vor- und Nachteile des Ebenenkonzepts.

3.3 Visualisierte Elektronendichte als Voxelmenge

Dieses Denkmodell sieht vor, dreidimensionale Körper aus den Bildelemente der Matrizen, die auf der rekonstruierten Elektronendichte basieren, darzustellen (siehe Kap. 2.4). Hierdurch wird eine enorm räumliche Visualisierung aufgrund der Kanten und Beleuchtung der Raumelemente erzielt. Mehrere Verarbeitungsschritte werden durchgeführt, um die Körper zu erstellen.

Die zuvor verarbeiteten Bildmatrizen (siehe Kap. 3.1) sind die Grundlage für die folgenden Prozesskomponenten (siehe Diagr. 3).

Die Ebenen bzw. Parallelogramme werden durch eine mathematische Formel als geometrische Formen konstruiert. Eine einfache Geometrie nach den Formeln 3.1 und 3.2 wird zur Konstruktion verwendet:

$$P_0(u) = u \cdot \vec{z}_{elev}, \quad h_{elev_0} \leq u \leq h_{elev_{max}}. \quad (3.1)$$

$$P(s, t) = P_0(u) + s \cdot \vec{v}_{lon} + t \cdot \vec{w}_{lat}, \quad x_{lon_0} \leq s \leq x_{lon_{max}}, \quad y_{lat_0} \leq t \leq y_{lat_{max}}. \quad (3.2)$$

$\vec{v}_{lon}, \vec{w}_{lat}, \vec{z}_{elev}$: Vektoren des Längen-, Breiten- und Höhenausdehnung;

$P_0(u)$: Aufpunkt des Parallelogramms (hier: initiale Elevation);

$h_{elev_0, max}$: minimale und maximale Elevation der beobachteten Elektronendichte;

$x_{lon_0, max}$: minimaler und maximaler Längengrad der beobachteten Elektronendichte;

$y_{lat_0, max}$: minimaler und maximaler Breitengrad der beobachteten Elektronendichte;

Formeln nach (NITSCHKE, 2005, S. 122).

Eine der Summanden ist jeweils konstant aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Konstellation der Seitenflächen. Drei Ebenen lassen sich dementsprechend durch drei Gleichungen gemäß der Ausdehnung der Objekte reproduzieren. Die verbleibenden drei Seitenfläche werden durch Verschiebung jener Ebenen konstruiert.

Der vereinfachte Ansatz eines Würfels bzw. Parallelepipede liegt bei der Verarbeitung vor, der durch sechs Seitenflächen modelliert wird. Ein kubisches Gitter wird durch geometrische Verschiebung jenes Parallelepipedes (HILBERT und COHN-VOSSEN, 2011, S. 42-43) umgesetzt (siehe Abb. 10).

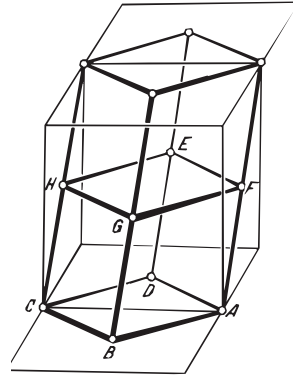


Abbildung 10: Kubisches Gitter nach HILBERT und COHN-VOSSEN (2011).

Die Würfel werden aufgrund geodätischer Überlegungen im Gradnetz des geographischen Koordinatensystems nach WGS84-Datum⁴ in Google Earth transformiert (GOOGLE, 2007a, S. 98), so dass in erster Näherung Trapezprismen als Voxel in Google Earth dargestellt werden (siehe Abb. 11).

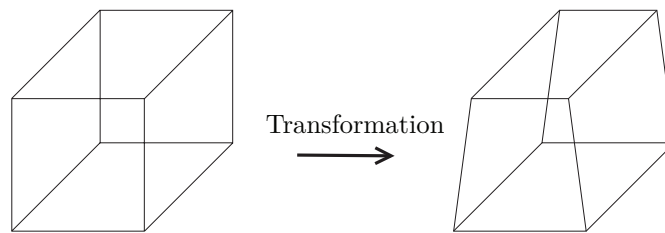


Abbildung 11: Umwandlung der konstruierten Würfel in Trapezprismen.

Die vorher berechneten Werte der rekonstruierten Elektronendichte werden als Farbwerte nach einer Farbtabelle indiziert⁵ und den Flächen bzw. Voxel als Farbinformation übertragen.

Eine Menge der Elementen der Matrix wird unter einem festgelegten Schwellenwert in der Modellierung ausgeschlossen, um die für die Darstellung relevanten Raumelemente als Voxelmenge darzustellen. Vordergründig liegt das Interesse in signifikant hohen Werten (siehe Kap. 2.1), so dass die Umgebung des Maximums der Elektronendichteverteilung visualisiert wird.

Um eine homogene geschlossene Voxelmenge zu erhalten, werden die Innenflächen der Körper ausgehend von Nachbarschaftsbeziehungen von der Modellierung ausgeschlossen. Die unmittelbare Umgebung der Elemente der Bildmatrizen wird als fokale Operation untersucht (TOMLIN, 1990, S. 97,155). Da Würfel respektive Trapezprismen modelliert werden, sind die relativ zum jeweiligen Bildelement diagonalen Bildbestandteile nicht relevant, so dass ein Vergleich in der 4er-Nachbarschaft, die eine Differenzie-

⁴Das (geodätische) Datum ist eine Menge von festgelegten Parametern eines Bezugssystems (HECK, 1995, S. 108-109).

⁵Indizierung legt hier für jeden Matrixwert einen Index nach einer festgelegten Tabelle fest

nung nach den vier Himmelsrichtungen vorsieht, stattfindet (JÄHNE, 2002, S. 32-34).

Der Konstruktion nachfolgend, wird der Quellcode für jede Fläche des Voxels generiert und in eine Datei geschrieben.

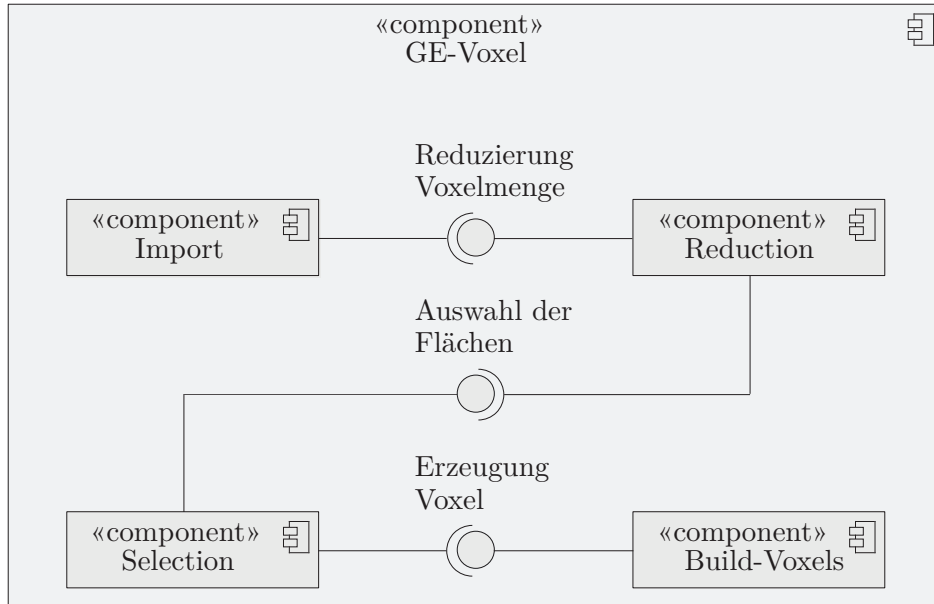


Diagramm 3: UML-Komponentendiagramm der realisierten Voxel.

Der Entwurf der Voxelmenge stellt eine tatsächliche dreidimensionale Modellierung der Elektronendichte bereit, die aber enorm komplex und ausschließlich mit Fachwissen verständlich ist. Die Voxel werden prägnant dargestellt, so dass der Interpolationseffekt der höheren Pixelanzahl weniger wirksam ist. Diese Visualisierungsform benötigt einen enormen Rechenaufwand (siehe Tab. 3).

Vorteile	Nachteile
3D-Modellierung	hohe Komplexität
Prägnanz	schwieriges Verständnis
	hoher Rechenaufwand

Tabelle 3: Vor- und Nachteile des Voxelprinzips.

3.4 Gewährleistung der Operationalität

Die operationelle⁶ Verarbeitung der vorherig beschriebenen Konzepte in einem dafür konzipierten System, wie einer Online-Datenbank (hier SWACI), ist für die Visualisierung der graduellen und dauerhaften Vorgänge der Ionosphäre und Plasmasphäre

essentiell.

Um die Operationalität der Visualisierungsprodukte sicherzustellen, werden Programmkomponenten für ein Gesamtsystem entwickelt (siehe Diagr. 4).

Die Konventionen bzw. Konfigurationen des Systems sind insbesondere bei der Integration der entwickelten Programmkomponenten zu berücksichtigen. Eine Komponente mit Routinen zur Dekodierung der Konfigurationsdateien des operationell zu betriebenen Systems wird entwickelt. Diese induziert die internen Systemprozesse der Joborder-Funktionen, die für das Auslesen systemimmanenter Konfigurationsparameter aus einer Joborder-Datei verantwortlich sind. Hierfür sind spezielle Funktionen im System vorgesehen, die diesen Datensatz entschlüsseln und in einen für MATLAB konzipierte Format umwandeln. Zudem dekodiert jene Komponente die externen Konfigurationseinstellungen. Die Angaben der Höhen der untersuchten Schicht der Ionosphäre und Plasmasphäre sind hierbei für die Modellierung bzw. Visualisierung der Produkte relevant.

Die Darstellung von Zusatzinformationen der vormals besprochenen Konfigurationsangaben wird durch eine zusätzliche Komponente ermöglicht. Dieser Prozess gewährleistet die Darstellung des Datums und der Uhrzeit der Aufnahme der Messdaten der Ionosphäre und Plasmasphäre. Diese Informationen sind wichtig, um die Darstellungen im administrativen Kontext der Operationalität einzuordnen.

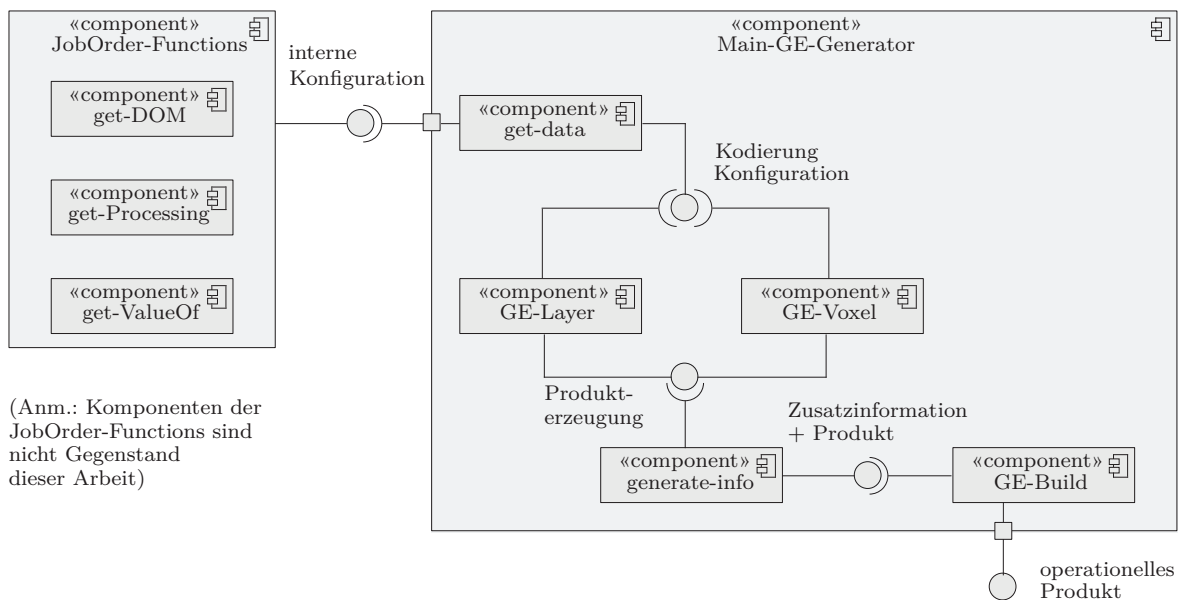


Diagramm 4: UML-Komponentendiagramm des operationellen Produkts.

Die Flexibilität der erzeugten Produkte ist sichergestellt. Die jeweiligen Produkte werden je nach Entscheidung des Anwenders erstellt. Eine weitere Komponente ermöglicht die Übertragung bzw. Speicherung des erzeugten Quellcodes der modellierten Visuali-

⁶Operationalität bedeutet eine stereotypische Abarbeitung eines Arbeitsvorgangs.

sierungselemente. Handelt es sich um eine Modellierung der Ebenen, werden zusätzlich Bilddateien angelegt. Die Ausgabedateien werden hierbei als Archiv zusammengefasst, um eine vereinfachte Verwaltung und bessere Praktikabilität der operationellen Daten zu erbringen.

Um ein grundlegendes Verständnis für die Vorgänge der Komponenten zu erhalten, ist der konkrete Verlauf der internen Prozesse der Programmeinheiten zu erörtern (siehe Diagr. 5).

Zunächst wird durch den Anwender die Bezeichnung der Joborder-Datei angegeben. Diese enthält eine enorme Menge von Parameterwerten, aus der eine Auswahl der nächsten Komponente zukommt. Die Konfiguration des Programmsystems wird durch jene Komponente erfasst. Eine Fallunterscheidung hinsichtlich der Visualisierung wird in der Hauptkomponente getroffen, wovon das endgültige Visualisierungsprodukt abhängt. Die bereits diskutierten Alternativen der Ebenen- und Voxeldarstellung sind möglich. Die abgefragte Konfigurationseinstellung bezüglich der Höhen geben Aufschluss über die Ausdehnung der Visualisierung.

Das an die nächste Komponente übergebene Produkt der Visualisierung und die verbleibende Konfiguration des Komponentensystems werden appliziert, um das Visualisierungsprodukts um Zeitangaben zu ergänzen. Das angepasste Produkt der Visualisierung wird der nächsten aktiven Komponente übergeben und mit ausführliche Beschreibungen komplettiert. Das darzustellende Produkt wird archiviert, so dass die gesamten Ausgabedateien gebündelt vorliegen.

Die Visualisierungskomponenten werden auf einen Datenbank-Server (SWACI) integriert, deren operationelle Ergebnisse online dem Anwender in einem Webinterface zur Verfügung stehen (DLR, 2011). Die Programmkomponenten werden mit Berücksichtigung des hier nicht näher erläuterten Joborder-Mechanismus und einer eindeutigen Dateistruktur (Ein- und Ausgabedateien) der Systemverwaltung (DIMS⁷) unterstellt und auf dem Server in einer PSM-Einheit ausgeführt, so dass die Visualisierungsprodukte operationell als Archive nach einem Zeitzyklus (hier: stündlich) erstellt werden können (siehe Diagr. 6). Der Administrator jenes Systems kann sowohl die Art des Visualisierungsprodukts als auch den Zeitzyklus der Verarbeitung beeinflussen. Der Anwender hat ausschließlich Zugang zu den Bildern der Visualisierungsprodukte, die mit einer gewöhnlichen Applikation (Browser) begutachtet werden können.

⁷Verwaltungssystem für Daten jeglicher Art; Institut intern (DLR Neustrelitz).

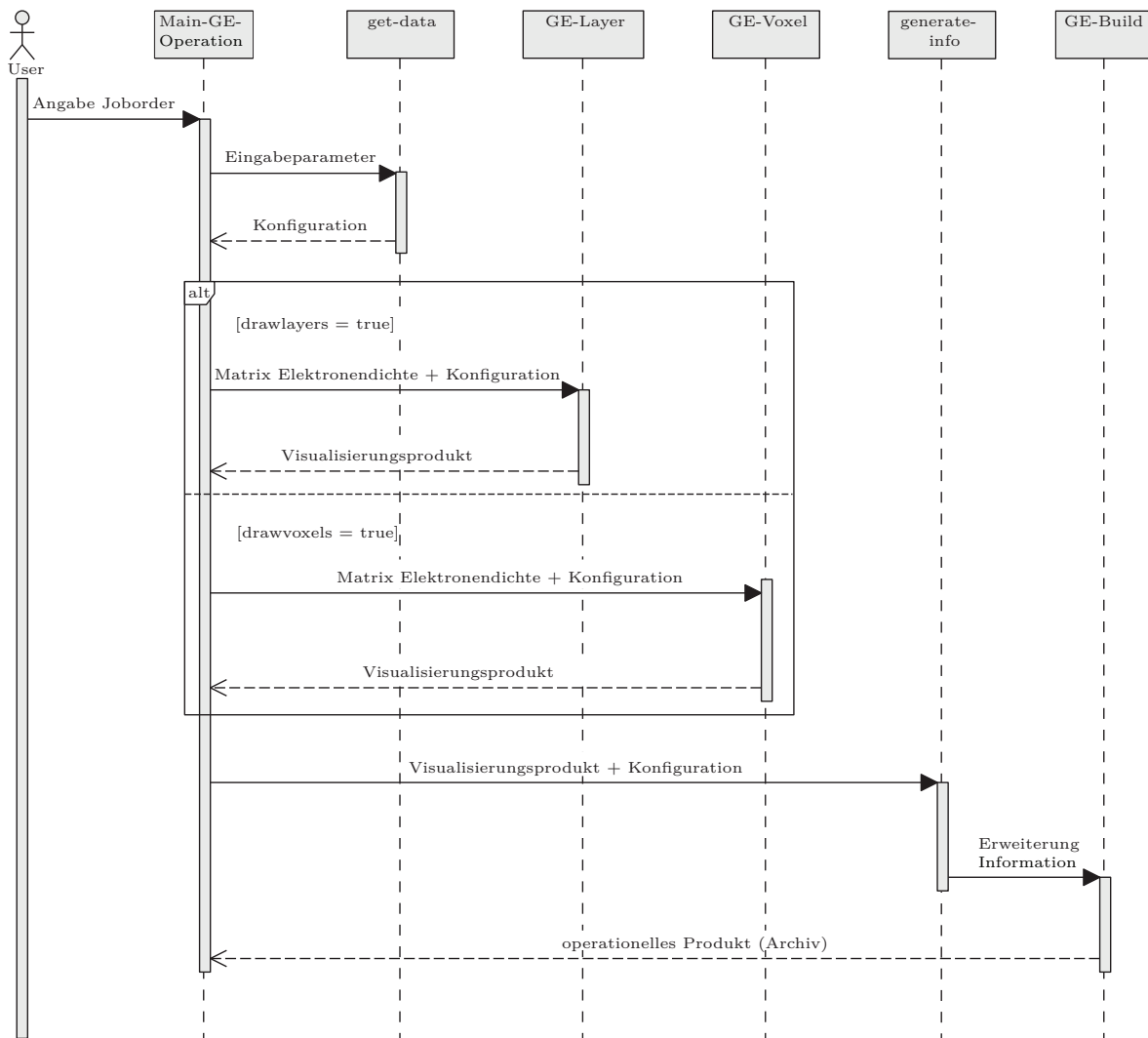


Diagramm 5: UML-Sequenzdiagramm des operationellen Produkts.

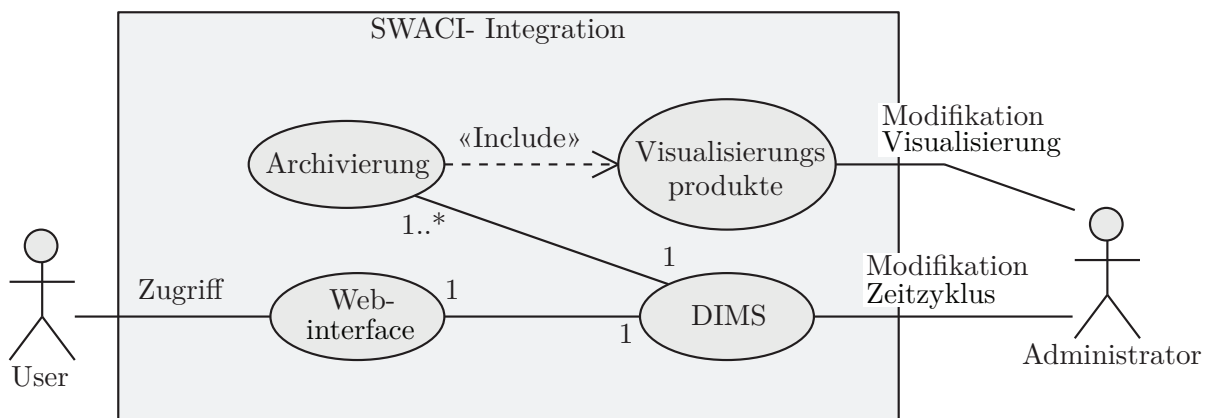


Diagramm 6: UML-Anwendungsfalldiagramm des operationellen Systems.

Kapitel 4

Umsetzung

Die Verwirklichung der genannten Teilkonzepte bzw. Programmkomponenten ist für die Erzeugung der Visualisierungsprodukte ausschlaggebend. Einer Erläuterung der zugrundeliegenden Technologien und den Lösungsschritten der Programmierung sind notwendig. Das schließt ebenso die Aspekte der Handhabung und Dekodierung der Eingangsdaten mit ein, um die Operationalität sicherzustellen. Diverse durchgeführte Anpassungsmöglichkeiten der Visualisierungsform sind für eine optimale Darstellung in Google Earth maßgebend.

4.1 Realisierung der Komponenten

Die konkrete systematische Umsetzung der Komponenten bzw. der darin enthaltenen Funktionen ist ein komplexer Sachverhalt, den es detailliert zu beschreiben gilt.

4.1.1 Integration der Eingabedaten

Das operationelle System stellt systemimmanente Prozesse und Dateien bereit, die bei der Einbeziehung der vorliegenden Programmkomponenten zu berücksichtigen sind (siehe Diagr. 7). Die Angabe der Joborder-Datei ist obligatorisch, um das Komponentensystem zu initialisieren. Dieses XML⁸-Dokument besteht aus Parameter und Parameterwerten, die als sogenannte Marken (Tags) implementiert sind.

Diese Datei enthält als Parameterwerte u.a. die für das operationelle Programm wichtige Bezeichnung der Speicherorte der Eingabe- und Ausgabedateien. Der Programmkomponente `get-data` wird als Argument die dementsprechenden Parameter `Input` und `Output` übergeben. Diese Komponente löst die Prozesse (Joborder-Functions) aus, die jene XML-Datei einlesen und nach den gesuchten Tags sondieren. Die erhal-

⁸Metasprache zur Konstruktion von (Programmier-) Sprachen und Wortschätzen (JACOBS, 2006, S.2).

tenden Parameterwerte werden in einer Struktur⁹ gespeichert. Als Abfragenamen der Struktur werden die Bezeichnungen der Joborder-Parameter verwendet, um eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten. Nachdem das Erfassen der internen Konfiguration geleistet ist, werden die externen Einstellungen aus einer MAT-Datei als Struktur durch jene Komponente mittels der MATLAB-Funktion (`load`) dekodiert. Die Angaben der Zeit und Höhe der Visualisierung sind von primärer Bedeutung.

Das durch externe Prozesse generierte Produkt der rekonstruierten Elektronendichte, welches als binäre MAT-Datei vorliegt, wird in der Komponente `Main-GE-Operation` durch eine bereits vorgestellte Funktion (`load`) eingelesen und als Matrix gespeichert. Der binäre Aufbau der Datei erzielt eine schnelle Verarbeitung, welche Kompatibilitätsproblemen gegenübersteht. Die mit MATLAB 7 generierte MAT-Datei ist nicht zu älteren Versionen interoperabel.

Die Darstellungseinstellungen werden zur einheitlichen Gestaltung der Visualisierung als Konfigurationsstruktur festgelegt, die die Farbtabelle, die Farbstufen, Intervallgrenzen der Elektronendichte und Ausbreitung (Längen- und Breitengrad) der Darstellung vorgibt. Die Farbtabelle bestimmt den Farbton der Darstellung und die Farbstufenanzahl beeinflusst die Qualität der Farbverläufe. Die Schwellenwerte ($p_{thres1,2}$) der Transparenzmodifikation und Reduktion der Bildelemente werden konstantiert.

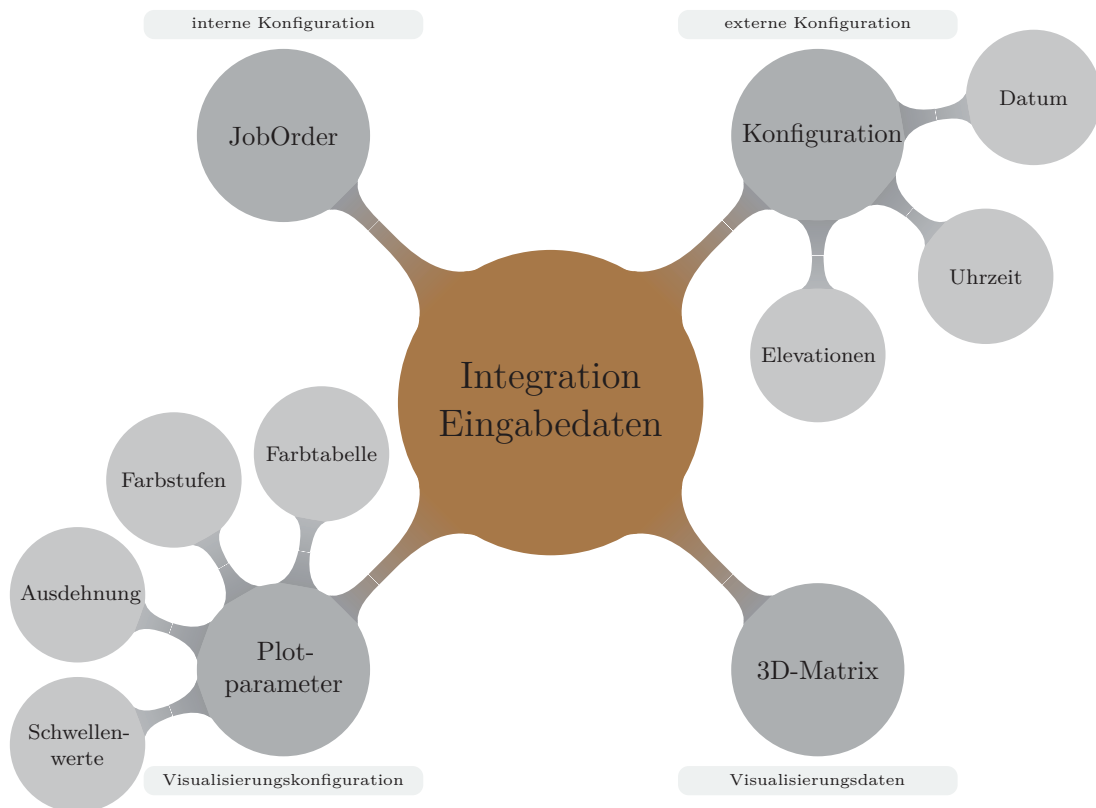


Diagramm 7: Mindmap der Integration der Programmkomponenten.

⁹Komplexer MATLAB- Datentyp, der mehrere Datentypen mit Parameternamen speichern kann.

4.1.2 Umsetzung der Interpolation und Transparenz

Die formatierten Ausgangsdaten werden für die weitere Verarbeitung in der Hauptkomponente **Main-GE-Operation** als Bildmatrizen interpoliert und mit Transparenzinformationen versehen (siehe Diagr. 8).

Die rudimentäre Matrix wird als dreidimensionale Oberfläche (**surf**) mit farbigen Konturen in einer festgelegten Pixelanzahl pro Dimension (Skalierungsfaktor p_{scal} im Hauptprogramm) in MATLAB modelliert. Die Matrix wird demnach für eine optimierte Darstellung auf eine größere Pixelanzahl pro Dimension interpoliert. Hierbei wird die bereits besprochene Farbtabelle einbezogen, um die indizierten Farbwerte darzustellen. Relevante Farbtabelle (gelb, rot, grün und blau) sind als Matrizen definiert.

Die Perspektive der Ansicht wird modifiziert, so dass eine Zentralprojektion der Oberfläche und somit ein 2D-Bild erzielt wird, welches als temporäre Bilddatei ausgegeben und persistent gemacht wird. Das temporäre Bild wird durch eine MATLAB-Funktion (**imread**) als Matrix mit RGB¹⁰-Farbinformationen eingelesen und mit erhöhter Pixelanzahl pro Dimension (r_{new}) gespeichert.

Die Matrix wird demnach in eine vierdimensionale Matrix umgewandelt, in der die ersten drei Dimensionen die Farbkanäle Rot, Grün und Blau nach RGB-Norm darstellen. Die vierte Dimension umfasst die Höhen der Visualisierung (siehe Abb. 12).

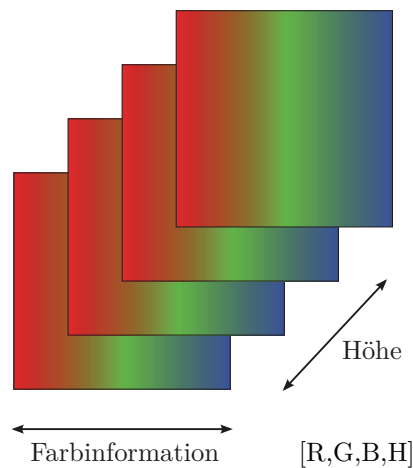


Abbildung 12: Informationen der RGB-Bildmatrizen.

Die Bildmatrizen resultieren für jede Höhe. Diese für jede Bildmatrix gesondert berechnete Transparenz unterstützt die Visualisierung der Elektronendichteverteilung, in dem die Bildelemente abhängig von der Elektronenkonzentration unterschiedlich durchscheinen.

Die Bordmittel der Google Earth-Toolbox zur Darstellung von Transparenz setzen einen bestimmten Wertebereich ($[0, 1]$) fest, so dass die Transparenz jedes Bildelements

¹⁰Additives Farbsystem der Grundfarben (JÄHNE, 2002, S. 167,575).

durch einfache Gewichtung der rekonstruierten Elektronendichte nach der Formel 4.1 berechnet wird:

$$x_{alpha} = \frac{x_{elem}}{(c_{high} - c_{low})}. \quad (4.1)$$

x_{alpha} : Grad der Transparenz des Bilelements;

x_{elem} : Bilelement;

c_{high}, c_{low} : Intervallgrenzen der Elektronendichtewerte.

Einer modifizierten Berechnung nach der Formel 4.2 bedarf es bei der Voxeldarstellung:

$$\tilde{x}_{alpha} = \lceil \frac{x_{elem} \cdot 255}{(c_{high} - c_{low})} \rceil. \quad (4.2)$$

\tilde{x}_{alpha} : gerundeter Grad der Transparenz des Voxels.

Die erhaltenden Transparenzwerte der Voxelmenge sind im entsprechenden Wertebereich $([0, 255])$, um die zwingende Umwandlung ins hexadezimale Intervall $([00, ff])$ mithilfe einer MATLAB internen Programmfunktion (`dec2hex`) durchzuführen.

Die Transparenzen der Bilelemente werden für jede Bildmatrix als Transparenzmatrix (Maske) im jeweiligen Wertebereich zusammengefasst. Die erstellten Transparenzmasken der Bildmatrizen werden im selben Maße wie die Daten der rekonstruierten Elektronendichte skaliert bzw. interpoliert. Hierfür wird eine Funktion MATLABs (`imresize`) genutzt, die die Transparenzmaske als zweidimensionale Matrix ohne komplexe Farbinformationen interpoliert.

Demnach werden keine zusätzlichen Matrizen angelegt, sondern lediglich Zwischenwerte der originären Transparenzwerte ermittelt, um eine höhere Pixelanzahl für jede Dimension zu gewährleisten. Jedem Farbtripel (R, G, B) der interpolierten Bildmatrizen der rekonstruierten Elektronendichte wird de facto einem Transparenzwert zugewiesen. Die Transparenzinformationen (lediglich eine Maske bzw. einem Alpha-Kanal) sind für jene Visualisierungsform hinreichend.

Der in diesem Abschnitt beschriebene Prozess wird prozedural für jede Höhe ausgeführt. Diese Verarbeitung wird durch ein Schleifenkonstrukt (For- Schleife) realisiert.

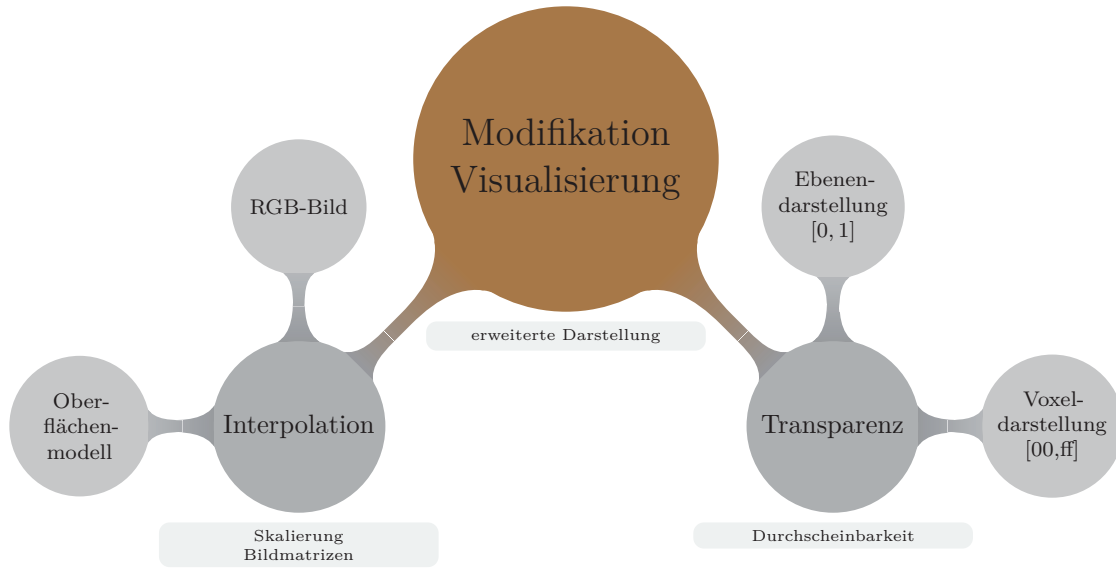


Diagramm 8: Mindmap der realisierten Verarbeitung der Visualisierung.

4.1.3 Generierung der Ebenen

Die Visualisierungsprodukte werden flexibel nach dem Ebenen- oder Voxelprinzip auf Grundlage der Einstellung des Anwenders erzeugt. Je nach Anpassung erstellen die Komponenten **GE-Layer** und **GE-Voxel** jene Produkte. Eine Auswahlmöglichkeit wird in der Hauptkomponente **Main-GE-Operation** realisiert, welches den Wert eines festgelegten Kontrollparameters im Hauptprogramm auf Gültigkeit prüft. Ist der assoziierte Parameterwert korrekt und damit die Bedingung erfüllt, wird die Erzeugung des Visualisierungsprodukts ausgelöst. Hierbei wird der Parameter **drawlayers** geprüft. Ist der Vergleich zutreffend, wird die Ebenendarstellung gestartet, anderenfalls wird der Parameter **drawvoxels** nach der Voxeldarstellung geprüft. Die Arbeitsvorgänge der ersten Alternative der gestarteten Komponente **GE-Layer** werden erläutert. Die Bildmatrizen werden an jene Programmeinheit übertragen.

Die zuvor diskutierte Struktur der Visualisierungskonfiguration (Plot-Parameter) wird durch die Komponente **Import** eingelesen und deren Elemente an Variablen zugewiesen. Zudem werden die Höhenangaben der externe Konfiguration bei der nachfolgenden Visualisierung als Variablen berücksichtigt, indem deren Werte dem Parameter der externe Konfigurationstruktur entnommen werden. Die Höhen liegen in der Struktur als Zeilenvektor vor.

Die Bildmatrizen mit Farb- und Transparenzinformationen werden hinsichtlich der Transparenz differenziert, in dem Bildelemente der Matrix unter einem konstanten Schwellenwert der Elektronendichte aus der Visualisierungskonfiguration (siehe Kap. 4.1.1) mit einer höheren Durchscheinbarkeit nach der Formel 4.3 dargestellt und somit die verbleibenden Bereiche betont werden. Das wird durch einen Vergleich des Matrix-

elements mit dem Grenzwert p_{thres1} bewerkstelligt:

$$x_{alpha_{new}} = x_{alpha} \cdot p_{clear} \cdot \quad (4.3)$$

$x_{alpha_{new}}$: modifizierte Transparenz des Bildelements;

x_{alpha} : Transparenz des Bildelements;

p_{clear} : Grad der Modifikation.

Die Lichteffekte werden in der Komponente **Light-Effects** für die Ebene bzw. Bildmatrix modelliert, die unter üblichen Bedingungen noch erhebliche Werte der Elektronenkonzentration aufweist (F-Schicht). Die Betonung der Konturen jener Ebene wird ebenfalls durch Oberflächenmodellierung MATLABs mit farbigen Konturen, basierend auf den genannten Farbtabelle, realisiert.

Diese Oberfläche wird durch eine Funktion des Lichtobjekts (**light**) mit speziellen Phong-Lichteffekten ausgeleuchtet. Diese Ausleuchtung wird bei der Einstellung der Oberflächenbeleuchtung (**FaceLighting**) aktiviert. Die Phong-Beleuchtung erzeugt eine eindrucksvollere Konturenbetonung als andere Beleuchtungsmethoden wie Flat- und Gouraud-Schattierung (siehe Abb. 13). Diese Schattierungsmethode beansprucht indes enormen Rechenaufwand und ist inexakt. Die Farbkonturen werden durch Angabe der Oberflächenfärbung (**FaceColor**) linear geglättet (**interp**).

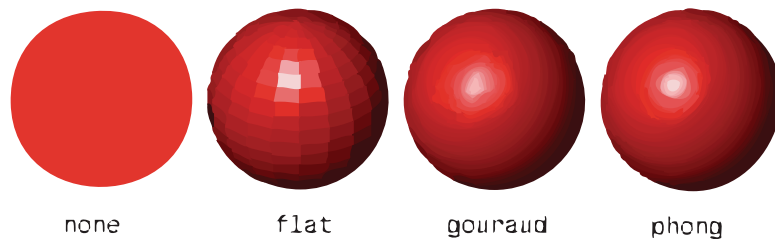


Abbildung 13: Schattierungsmethoden der Oberflächen nach MATLAB (2011).

Die Perspektive wird, ähnlich wie bei der Bildskalierung (siehe Kap. 4.1.2), auf eine Zentralprojektion zur Erstellung von 2D-Bildern gestellt. Das Ergebnis wird in eine temporäre Bilddatei übertragen und gespeichert. Das temporäre Bild wird als RGB-Bild geladen, deren Farbgebung mit einer MATLAB Bildbearbeitungsfunktion MATLABs (**imadjust**) angepasst bzw. verbessert (Gamma-Korrektur) und als vierdimensionale RGB-Bildmatrix gespeichert. Die Zuweisung einer Farbtabelle von maximal 2^8 (256) Einträgen einer zu indizierenden Matrix erweist sich als nicht angemessen, um die Beleuchtung farblich zu erfassen, daher wird die komplexe RGB-Farbraum mit 2^{24} Farben für die anspruchsvolle Lichteinwirkung verwendet.

Die modifizierten Bildmatrizen werden als Schichten (Ground-Overlays), die sphärisch um die Erde liegen, durch die Funktion **GE-Imagesc** der Google Earth-Toolbox in

der Komponente `Build-Layers` modelliert. Die Bildmatrizen, die Transparenz-Masken, die Höhenwerte aus der externen Konfigurationsstruktur, die Grenzen der Elektronendichteverteilung und die Darstellungsausdehnung der Oberflächen als geographische Koordinaten (Längen- und Breitengrad) aus der Visualisierungskonfiguration werden als bedeutende Argumente der Funktion übergeben. Zusätzliche Informationen der Ebenenbezeichnung und den Speicherort der Bilder werden überdies angegeben. Vorweg werden die Koordinaten und die Bildmatrix genannt. Die verbleibenden Argumente werden durch speziellen Objektbezeichnern nach der Spezifikation der Google Earth-Toolbox (SPAANKS und DAVIS, 2007a) in Hochkommata (Zeichenketten) angezeigt:

```
ge_imagesc(xlon, ylat, Mdata,
           'alphaMatrix', Dalpha,
           'altitude', helev,
           'cLimLow', clow, 'cLimHigh', chigh,
           <Zusatzinformationen>)
```

x_{lon}, *y_{lat}*: Ausbreitung in Längen- und Breitengrad;

M_{data}: Bildmatrix;

D_{alpha}: Transparenz-Maske;

h_{elev}: Höhenwert;

c_{low}, *c_{high}*: Grenzwerte der Elektronendichte.

Diese Funktion verarbeitet die jeweiligen Bildmatrizen, Transparenz-Masken und Höhen und erzeugt den adäquaten KML¹¹-Quellcode. Zudem werden Bilddateien im PNG-Format aus den Bildmatrizen gefertigt. Diese stellen die Schichten in Google Earth dar, die durch den KML-Quelltext bzw. deren Marken angezeigt werden.

Schleifenkonstrukte in der Hauptkomponente werden verwendet, um die Bildmatrizen und Schichten prozedural zu realisieren. Hierbei werden die Indizes der Bildmatrizen und Ebenen bzw. Höhen durchlaufen. Der KML-Programmcode wird für jede Schicht bzw. jeden Schleifendurchgang erstellt und in einer Variable gespeichert, so dass der Quelltext kumuliert ist. Der vollkommene Programmcode wird der Komponente `generate-info` übertragen.

¹¹Beschreibungssprache für die Darstellungselemente in Google Earth

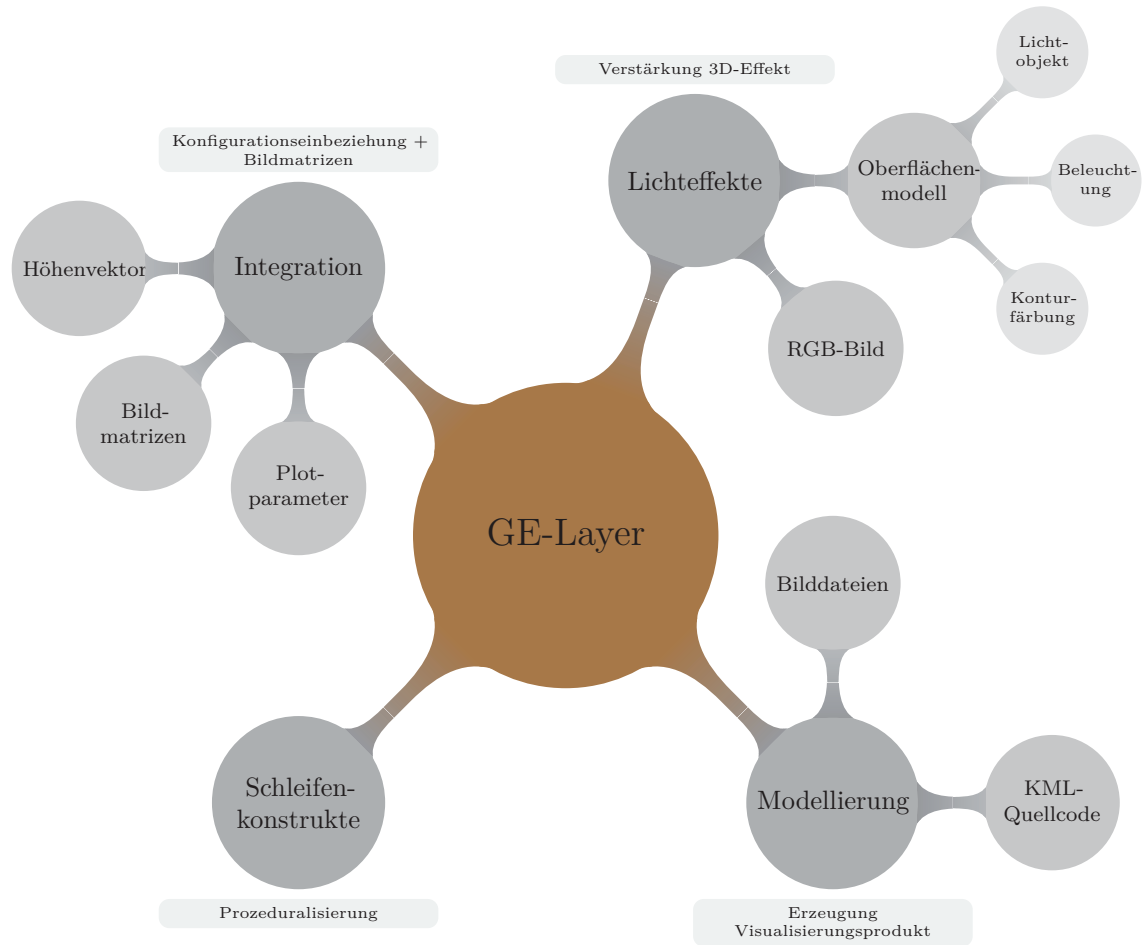


Diagramm 9: Mindmap der verarbeiteten Ebenen.

4.1.4 Generierung der Voxelmenge

Ist die Bedingung des Kontrollparameters `drawvoxels` erfüllt, wird die Visualisierung der Voxelmenge der Komponente `GE-Voxel` im Hauptprogramm induziert und die Bildmatrizen übergeben.

Der Arbeitsvorgänge der Komponente `GE-Layer` vergleichend, werden Visualisierungskonfiguration und externe Konfiguration durch die Komponente `Import` eingelesen und deren Elemente an Parameter zugewiesen. Die grundlegende Ausdehnung der Voxel wird für ein Längen- und Breitengrad durch eine vereinfachte Berechnung nach den Formeln 4.4 und 4.5 ermittelt:

$$V_l = \lceil \frac{360}{r_{new}} \rceil. \quad (4.4)$$

$$V_w = \lceil \frac{V_l}{2} \rceil. \quad (4.5)$$

V_l : (gerundete) Länge der Voxel nach λ ;
 V_w : (gerundete) Breite der Voxel nach ϕ ;
 r_{new} : interpolierte Pixelanzahl pro Dimension.

Aus diesen Angaben wird die Schrittfolge der Iteratoren der implementierten Schleifenkonstrukte abgeleitet. Ergibt zum Beispiel die (interpolierte) Pixelanzahl für jede Dimension bzw. Menge an Voxel 219, werden 2 Voxel je Längengrad und dementsprechend 1 Voxel je Breitengrad prozedural erstellt. Das summiert sich auf eine enorme Menge von insgesamt 64800 ($360 \cdot (1 \cdot 180)$) Voxel, für deren Realisierung viel Rechenaufwand benötigt würde.

Da nur Gebiete der hohen Elektronenkonzentrationen wissenschaftlich von Interesse sind (siehe Kap. 2.2), kann eine enorme Menge der zu erzeugenden Voxel vorweg in der Programmeinheit **Reduction** reduziert werden, in dem eine Fallunterscheidung realisiert wird. Falls bestimmte Bildelemente der Matrix unter einem im Hauptprogramm festgelegten Schwellenwert (p_{thres2}), fallen, werden sie von der nachfolgenden Transformation in Voxel ausgeschlossen. Hierfür wird eine Fortsetzungsanweisung (**continue**) aufgerufen, die den Durchlauf des Schleifenkonstrukts unterbricht und mit dem nächsten Schleifendurchgang fortsetzt.

Weiterhin sind die Innenflächen der gänzlichen Voxelmenge uninteressant, störend und letztendlich sogar redundant. Diese werden mittels einer komplexen Vergleichsmethode in der Komponente **Selection** entfernt. Hierbei werden mehrere Vergleiche am Bildelement (m,n) angewendet, die jeweils die benachbarten Bildelemente $(m-1, n)$, $(m, n+1)$, $(m+1, n)$ und $(m, n-1)$ nach dem Schwellenwert p_{thres2} prüfen. Ausgehend von den Ergebnissen der Überprüfung, werden die Indizes $\{4, 10, 1, 7\}$ in eine aus vier Elementen bestehende Matrix (Flächen-Maske F_{poly}) geschrieben und der hierarchisch darüber liegenden Komponente **GE-Voxel** übergeben (siehe Abb. 14).

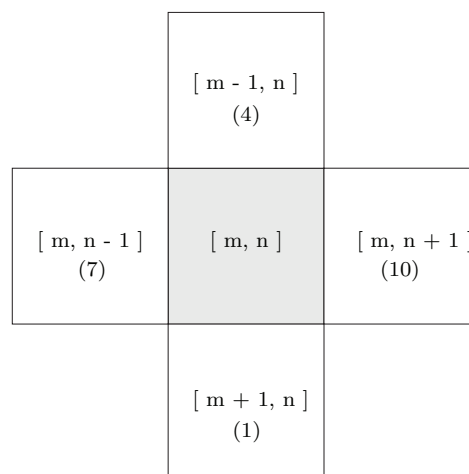


Abbildung 14: Analyse der Nachbarschaft der Bildelemente.

Liegt z.B. ein Bildelement in der oberen linken Ecke des Schwellenwertes, wird eine Flächen- Maske mit den Indizes (4, 0, 0, 7) erfasst und übermittelt. Die Bezeichnung der Indizes beruht auf der späteren Verarbeitung in der Programmeinheit `Build-Voxels`, in der die Voxel bzw. Seitenflächen konstruiert werden.

Die vorher erzeugten RGB-Farbinformationen (siehe Kap. 4.1.2) werden in eine hexadezimalen Darstellung (c_{hex}) durch eine bereits diskutierte Funktion (`dec2hex`) überführt, da die Bordmittel der Google Earth-Toolbox zur Erzeugung von Flächen nur eine Farbkodierung von 00 bis ff für jeden Farbkanal zulässt. Die umgewandelten Farbwerte werden den zu erstellenden Voxel zugewiesen.

Um die Unterschiede der Elektronendichte deutlich zu kennzeichnen, wird die (hexadezimal kodierte) Transparenz (\tilde{x}_{alpha}) der Bildmatrizen modifiziert, in dem die Transparenz der Bildelemente bzw. transformierten Voxel nach der Formel 4.6 gesteigert wird, die unter einen zuvor diskutierten Schwellenwert (p_{thres1}) fallen:

$$\tilde{x}_{alpha_{new}} = \tilde{x}_{alpha} - (p_{clear} \cdot 255). \quad (4.6)$$

$\tilde{x}_{alpha_{new}}$: modifizierte Transparenz des Bildelements;

x_{alpha} : Transparenz des Bildelements;

p_{clear} : Grad der Modifikation.

Die Höhen der Voxel (V_h) ergibt sich durch die Substraktion der nächst höhere Elevation mit der aktuellen Elevation (siehe Abb. 15). Aufgrund des sphärischen Charakters der Erde bzw. des Koordinatensystems (siehe Kap. 3.3) werden die Elevationsunterschiede der Bildmatrizen bzw. Voxelhöhen mit der Annäherung zu den Polen geringer. Die Modifikation der Körperhöhen wird durch Google Earth realisiert.

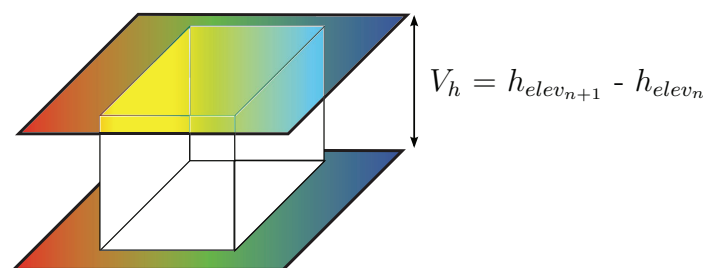


Abbildung 15: Körperhöhe des Voxels.

Überdies wird die Position der Darstellung als Längen- und Breitengrad (x_{lon}, y_{lat}) angegeben. Hiermit wird die Stelle verzeichnet, an der die Verarbeitung der Bildmatrizen in Voxel beginnt. Sie ist gemeinhin an die Aufbereitung der Beobachtungsdaten gebunden. Diese beginnt in der Regel beim Datumswechsel.

Die Elevationen werden der externen Konfiguration als Zeilenvektor im Umfang der Bildmatrizen entnommen. Einer Höhe ist eine zu verarbeitende Bildmatrix und einem damit verbundenen Transformationszyklus in Voxel zugeordnet.

Die Position (x_{lon}, y_{lat}) , Elevation (h_{elev}) , die Länge, Breite, Höhe (V_l, V_w, V_h) , Farbe (c_{hex}) und Transparenz $(x_{\tilde{alpha}})$ des Bildelements sowie die Flächenmaske (F_{poly}) werden der Komponente **Build-Voxels** übergeben, um den Transformationzyklus der Voxel einzuleiten.

Die Umwandlung der Bildelement in Voxel erfolgt, wie zuvor diskutiert, durch Konstruktion der Seitenflächen eines Würfels. Die Seitenflächen werden als Polygone mit gerichteten Vektoren konstruiert. Diese werden als spezielle Matrizen in Matlab realisiert. Sie sind nicht mit normaler analytischer Geometrie vergleichbar oder kongruent. Beispielsweise liegt die implementierte Konstruktion für die erste Seitenfläche, die parallel zum Breitengrad und senkrecht zu Erde steht, nach folgender Formel 4.7 vor:

$$P_1(s, t, u) = s \cdot \begin{pmatrix} V_l \\ x_{lon} \\ x_{lon} \\ V_l \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} V_h \\ V_h \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$x_{lon_0} \leq s \leq x_{lon_{max}}, \quad t = y_{lat}, \quad h_{elev_0} \leq u \leq h_{elev_{max}} \quad .$$

Die Position des Längengrades x_{lon} bzw. s ist hierbei veränderlich im Zusammenhang mit der prozeduralen Verarbeitung. Die Konstruktion der dazu parallelen Seitenfläche des Würfels wird durch Verschiebung bzw. Addition des konstanten Elements um die kongruente Größe der Dimension geleistet (hier: Voxelbreite V_w). Dieser Schritt wird bei allen folgenden Dimensionen durchgeführt. Die konstanten Glieder variieren je nach Dimension der Seitenfläche. Bei den folgenden zu den ersten zwei Seitenflächen senkrechten Polygonen (parallel zum Längengrad) werden zum Beispiel das Element s konstant und t variabel durch Hinzugabe der fortlaufenden veränderlichen Position des Breitengrades y_{lat} .

Das Konglomerat der Koordinaten wird aufgrund der performanteren Verarbeitung in eine Zelle¹² zusammengefasst:

$$C = \{ \vec{v}_{lon_1}, \vec{w}_{lat_1}, \vec{z}_{elev_1}, \\ \vec{v}_{lon_1}, \vec{w}_{lat_1} + V_w, \vec{z}_{elev_1}, \\ \vec{v}_{lon_2}, \vec{w}_{lat_2}, \vec{z}_{elev_2}, \\ \vec{v}_{lon_2} + V_l, \vec{w}_{lat_2}, \vec{z}_{elev_2},$$

¹²Komplexe MATLAB- Datenstruktur, die mehrere Datentypen umfassen kann, die durch Indizes zugreifbar sind.

$$\begin{aligned} & \vec{v}_{lon_3}, \vec{w}_{lat_3}, \vec{z}_{elev_3}, \\ & \vec{v}_{lon_3}, \vec{w}_{lat_3}, \vec{z}_{elev_3} + V_h \end{aligned}$$

$$C\{1, 2, 3, 4, \dots, 18\}$$

Die gesamten Konstruktionsschritte erhalten hierdurch Indizes (z.B. für die ersten beiden Flächen 1 und 4 und so fort). Hierauf aufbauend, ist die Zusammensetzung der Indizes der Flächen-Maske F_{poly} .

Die prozedurale Konstruktion wird durch ein Schleifenkonstrukt durchgeführt, in der die Indizes der Zelle durchlaufen werden. Bevor die geometrischen Konstruktion beginnt, wird jene Flächen-Maske nach allen Variationen der Indizes mittels Vergleiche geprüft. Trifft ein Index zu, wird durch deren Fortsetzungsanweisung die Konstruktion unterbrochen und im nächsten Schleifendurchgang bzw. Konstruktionsschritt fortgesetzt, so dass jene Fläche nicht erstellt wird.

Es wurde veranlasst, die Unterseitenflächen der Voxel nicht zu konstruieren, um die Darstellungsverarbeitung homogener und performanter zu gestalten. Das wird durch Überspringen des letzten Konstruktionsschritt bewerkstelligt, welches durch einen Vergleich und einer Fortsetzungsanweisung umgesetzt ist.

Die zentrale Anweisung zur Erzeugung der Seitenfläche bzw. Voxel ist die `GE-Poly3`-Funktion der Google Earth MATLAB- Toolbox, die als ausschlaggebende Argumente die Koordinaten (C), die Transparenz (x_{alpha}) und Farbe (c_{hex}) des Polygons erhält. Ferner wird ein Name des jeweiligen Polygons ($name_{poly}$) zur besseren Zuordnung vergeben und die Kantenbreite des Polygons (`LineWidth`) deaktiviert:

```
ge_poly3(C{1,4,7,...,16}, C{2,5,8,...,17}, C{3,6,9,...,18},
    'polyColor', x_alpha + c_hex,
    'lineWidth', 0,
    'name', name_poly)
```

Die Funktion generiert einen KML-Quellcode, in dem die Seitenflächen der Voxel als Polygone durch eine Marke `Polygon` ausgezeichnet sind. Die Koordinaten werden durch die Google Earth Toolbox kalkuliert und die Marke `coordinates` für jedes Polygon geschrieben. Die Farbe wird durch die Marke `color` für jedes Polygon geführt.

Der KML-Quelltext wird für jeden Transformationszyklus temporär in eine Variable gespeichert, um eine Kumulation des Quellcodes zu erzeugen. Der gänzliche Programmcode wird der Komponente `generate-info` zugewiesen.

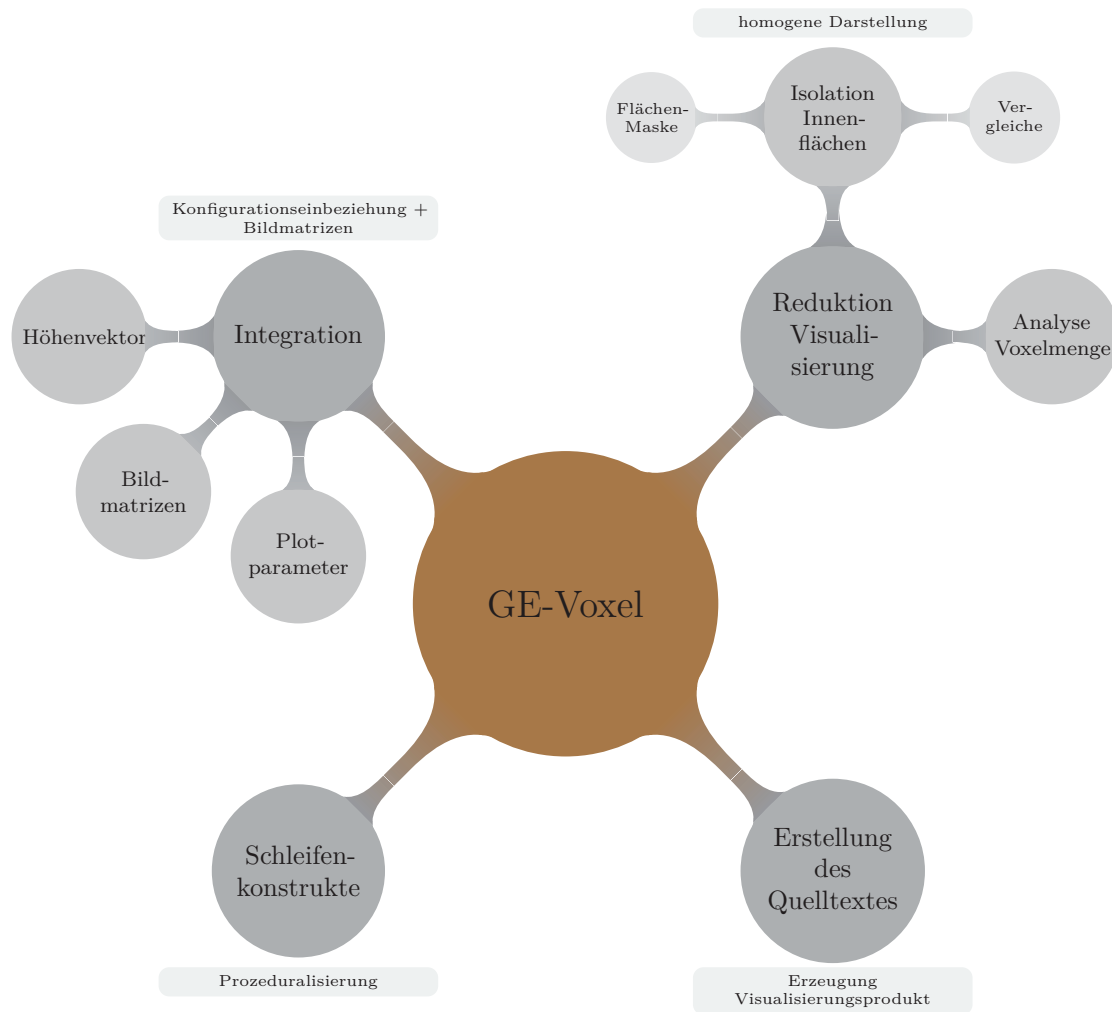


Diagramm 10: Mindmap der verarbeiteten Voxelmenge.

4.1.5 Erzeugung des operationellen Produkts

Archivierungsinformationen des Datums und der Uhrzeit sind für die Führung der Visualisierungsprodukt in einer operationellen Datenverwaltungssystem unabdingbar. Damit diese Visualisierung in diesem System schnell zeitlich zugeordnet werden können, werden die Archivierungsinformationen dargestellt.

Das von den Komponenten `GE-Layer` und `GE-Voxel` erzeugte Visualisierungsprodukt als KML-Quelltext bedarf somit einer Revision, um als operationelles Produkt zur Verfügung zu stehen (siehe Diagr. 11). Dieser Programmcode wird als String in der Komponente `generate-info` integriert.

Die zugeführten Archivinformationen können in Google Earth als sogenannte Bildschirmoberfläche hinzugefügt werden. Hierzu bedarf es einer zu erstellenden Bilddatei, welches jene Informationen darstellt.

Die Archivierungsinformationen (Tag, Monat, Jahr, Stunde und Minute) werden der externen Konfiguration entnommen und in verändertem Format als Zeichenketten

(Strings) abgespeichert:

⟨Tag⟩ / ⟨Monat⟩ / ⟨Jahr⟩
⟨Stunde⟩ : ⟨Minute⟩ UT

Zudem wird eine prägnante Bezeichnung der dargestellten Information (hier Elektrodichte) als Zeichenkette gespeichert.

Eine Darstellung dieser Zeichenketten wird durch eine MATLAB interne Funktion (`text`) realisiert, in der eine Modifikationen bezüglich der Schriftgröße (`FontSize`) vorgenommen wird, um die Archivinformationen übersichtlich zu gestalten. Die Darstellung wird in ein temporäres Bild überführt bzw. abgespeichert.

Dieses temporäre Bild enthält die erzielten Informationen, die bei ungünstiger Farbkonstellation in Google Earth unscheinbar werden. Daher wird das temporäre Bild zur Modifikation als Matrix eingelesen, um die Konturen der dargestellten Angaben durch einen (schwarzen) Rand hervorzugeben. Hierfür ist eine Funktion implementiert, die die zugrundeliegende Transparenz-Maske des Bildes manipuliert. Die Modifikation wird durch einen Vergleich umgesetzt, welches prozedural mit einem Schleifenkonstrukt die Nachbarschaften des Elemente des Informationsbildes nach einen Grenzwert der Farbe überprüft (siehe Kap. 4.1.4). Der Schwellenwert ist die Farbe der Kontur. Ist das untersuchte Bildelement mit jener Kontur benachbart, wird es dargestellt, anderenfalls wird es transparent, so dass die schwarzen Elemente nun als Randelemente der Kontur erscheinen. Die Matrix wird mit jener modifizierten Transparenz-Maske als PNG-Bild persistent gemacht.

Die Modifikation des KML-Quellcodes wird durch Ergänzung von Zeichenketten, die die zusätzlichen Parameter als Marken und Parameterwerte enthalten, realisiert. Zur Erweiterung des Quelltext um die Darstellung des Informationsbild wird das KML-Konstrukt der Bildschirmoberfläche (`ScreenOverlay`) integriert. Dieses unterhält unter anderem die bedeutende Bezeichnung des Speichernamens jener Bilddatei. Ferner ist die Darstellung des Copyright-Logos der Kooperation (DLR) als Bildschirmoberflächen durch jenes Konstrukt umgesetzt. Hierbei wird ebenso die Funktion zur Manipulation der Transparenz-Maske verwendet.

Die Angabe des Visualisierungsproduktes im Beschreibungskatalog Google Earths wird durch eine Beschreibungsmarke (`description`) hinzugefügt. Der Informationsdialog wird durch eine Marke des sogenannten Ballon-Stils (`BalloonStyle`) verwirklicht. Diese Ergänzungen werden im Kopf des KML-Konstrukts gemacht.

Der KML-Quellcode wird verkettet und als String der Komponente `GE-Build` übertragen. Diese Programmeinheit leitet den Quelltext in eine Datei. Dieses wird durch die ausschlaggebende `GE-Output`-Funktion durchgeführt, welche eine KML-Datei anlegt und den übergebenen Quelltext schreibt. Als wichtige Angaben werden der Quellcode

(s_{KML}) und der Speichernamen ($name_{out}$) gemacht. Als Zusatzinformation wird der Name des Visualisierungsprodukts ($name_{proj}$) gekennzeichnet:

```
ge_output(name_out, s_KML, 'name', name_proj)
```

Die generierte KML-Datei und die erzeugten Bilddateien (abhängig vom Darstellungsmodus) werden aufgrund einer einfacheren Verwaltung in eine Archiv-Datei (KMZ) zusammengefasst. ZIP-Archivdateien werden durch eine Komprimierungsfunktion MATLABs (`zip`) angelegt. Das KMZ-Format ist lediglich ein davon abgeleitetes Format, so dass das erstellte ZIP-Archiv ohne Komplikationen durch eine Funktion MATLABs (`movefile`) in eine KMZ-Datei umbenannt wird, welche Google Earth einlesen kann. Die erstellten Dateien werden als Argumente der Funktionen übergeben und der Namen des Archivs angegeben. Jene Dateien können durch ein Löschbefehl (`delete`) entfernt werden, so dass als Ausgabedatei die KMZ-Datei verbleibt.

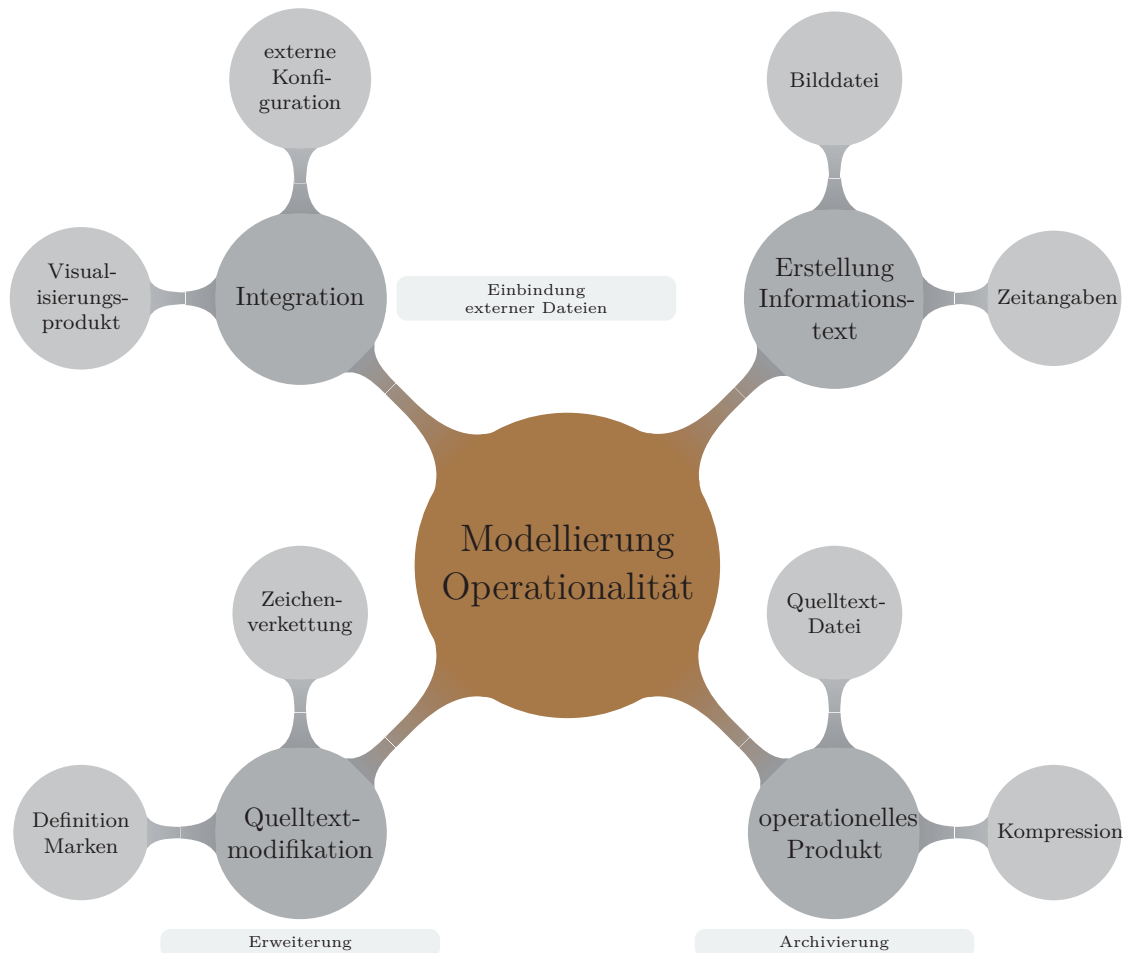


Diagramm 11: Mindmap des realisierten operationellen Produkts.

Als Zusammenfassung der Implementation des operationellen Prozesses ergibt sich ein komplexer Arbeitsvorgang mit mehreren Schleifenkonstrukte und einer wesentlichen Fallunterscheidung (siehe Diagr. 12 und Anhang).

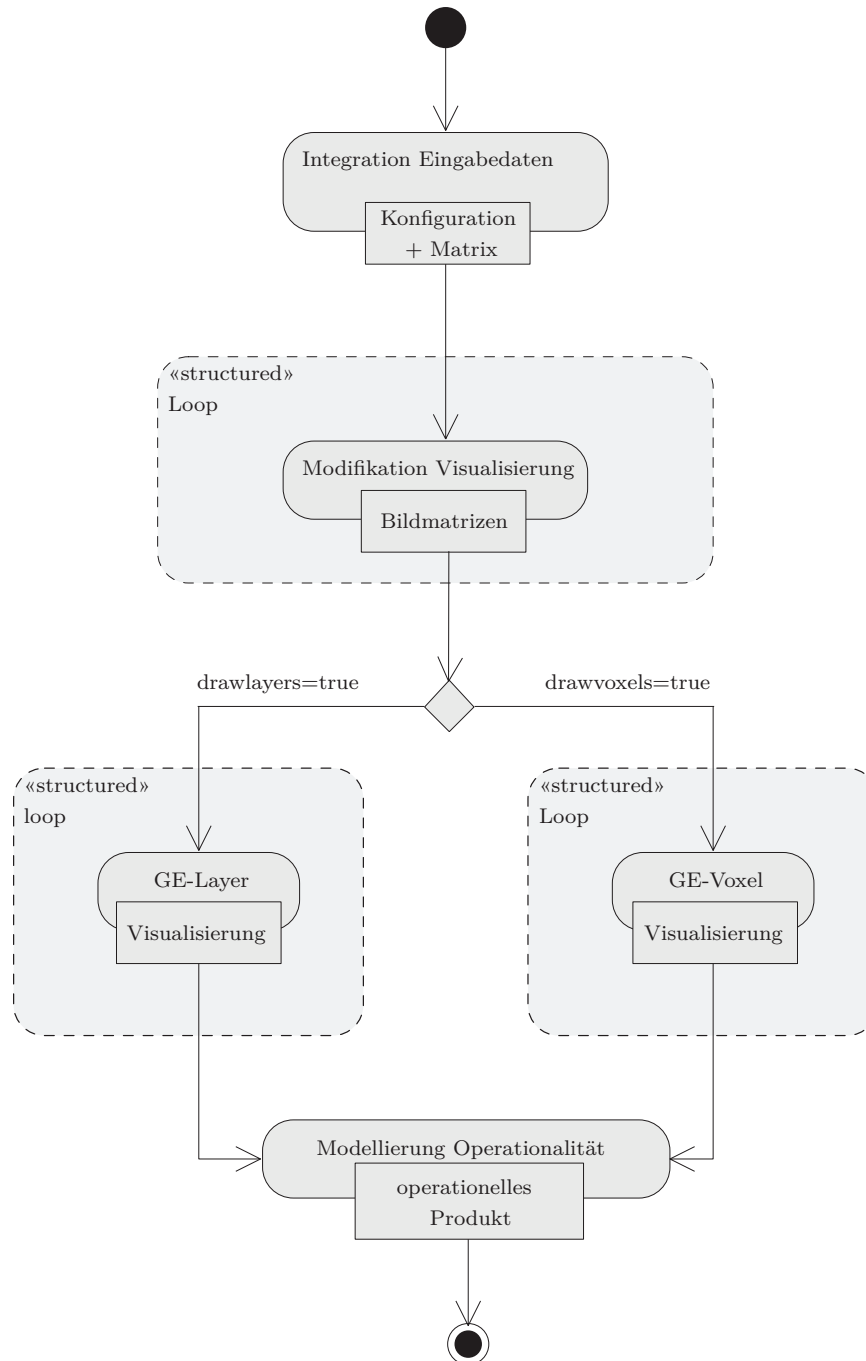
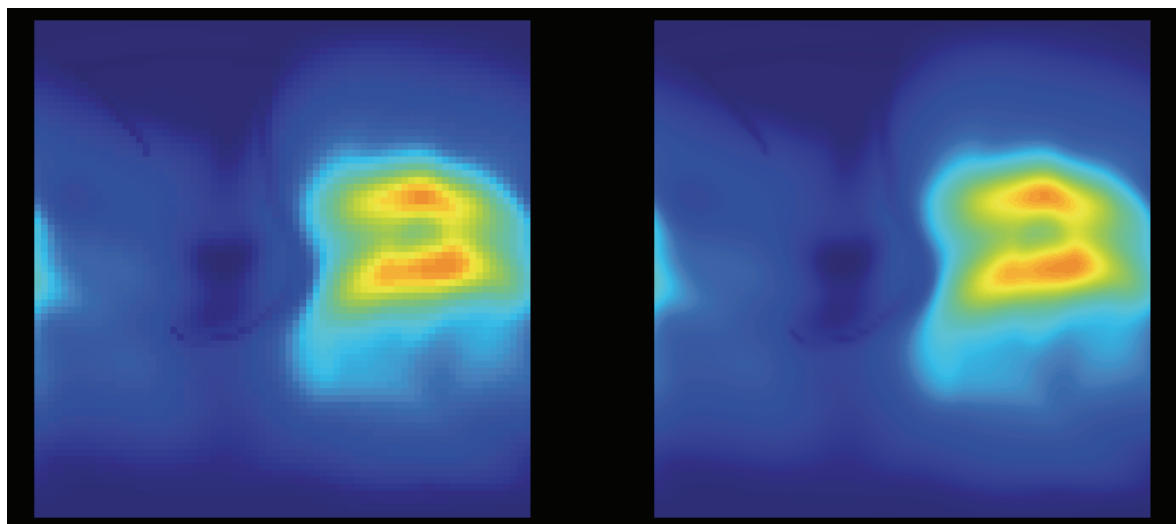


Diagramm 12: UML-Aktivitätsdiagramm des operationellen Produkts.

4.2 Ergebnisse

Die Sichtung der Zwischenresultate der Visualisierung sind ein wichtiger Arbeitsschritt, um die Programmpunkte der gesamten Applikation zu kontrollieren. Sie dienen dem Anwender als hilfreiche Unterstützung bei der Begutachtung der späteren Visualisierungsprodukte, welcher durch den dargestellten technischen Hintergrund der Realisierungen fundiert wird. Die Anpassungen und Grenzen der Darstellungen werden durch die Erläuterungen und Illustrationen deutlich.

Die reinen Ausgangsdaten der rekonstruierten Elektronendichte, die als Matrix in MATLAB vorliegen (siehe Kap. 3.1) besitzen eine geringe Pixelanzahl pro Dimension. Eine Darstellung ohne weitere Modifikationen der Matrix würde in eine sehr grobe, scharfkantige und unästhetische Darstellung der Messdaten resultieren, da sich die geringen Pixel auf einen sehr großen Bereich in Google Earth ausdehnen. Abhilfe schafft eine lineare Interpolation der Messdaten, die durch Berechnung zusätzlicher Werte zwischen den originären Rohdaten eine höhere Pixelanzahl für jede Dimension ermöglicht. Die Zwischenwerte glätten die Farbübergänge der originalen Matrix, so dass die gänzliche Visualisierung dieser Rohmatrix nach Farbkonturen ansprechender wird (siehe Abb. 16). Die RGB-Norm ermöglicht, dass die Farbübergänge auch in geringer Pixelanzahl pro Dimension noch glatt erscheinen, da der Farbumfang wesentlich vergrößert wird, im Gegensatz zu der MATLAB markanten Farbindizierung auf eine Palette.



ohne Interpolation

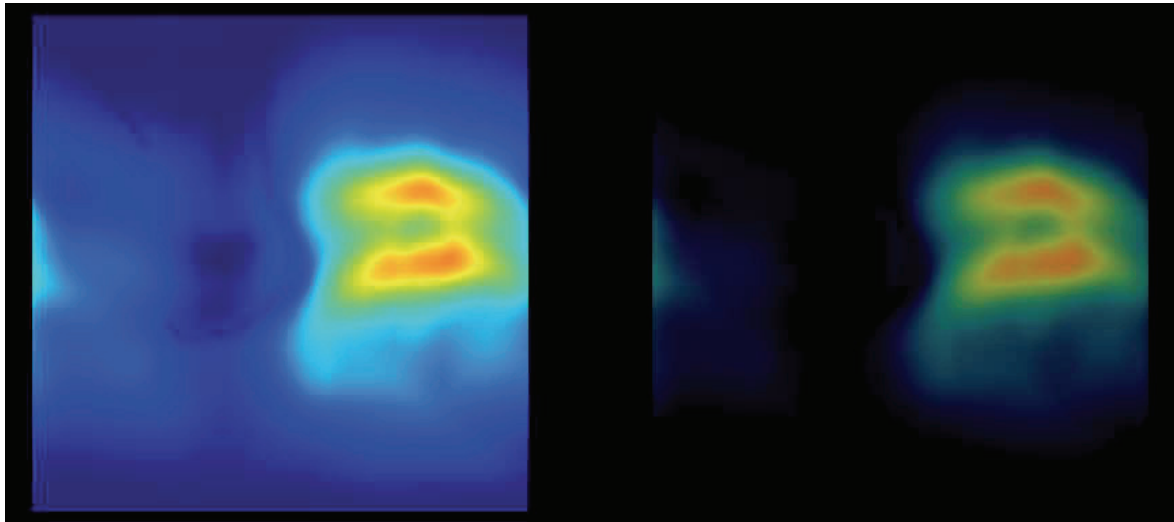
mit Interpolation

Abbildung 16: Interpolation der rudimentären Matrix.

Obgleich ist zu erwähnen, dass dieses Verfahren im engeren Sinne mathematisch bzw. messtechnisch unzulänglich ist, da die zusätzliche Zwischenwerte aus den Rohdaten lediglich linear interpoliert werden, aber nicht Grundlage eines qualitativ und quantitativ hochwertigeren Berechnungsmodells sind. Dieses Verfahren ist keine genuine sondern

ästhetische Optimierung des Ausgangsmaterials.

Um die optisch aufgewerteten Daten plastischer werden zu lassen, wird ein möglicher Ansatz von darzustellenden Transparenzunterschieden gewählt. Jeder Elektronendichtewert erhält einen Transparenzwert nach Gewichtung (siehe Kap. 4.1.2). Umso höher die Elektronenkonzentration ist, desto geringer die Transparenz und höher die Opazität des zugeordneten Farbwertes (siehe Abb. 17).



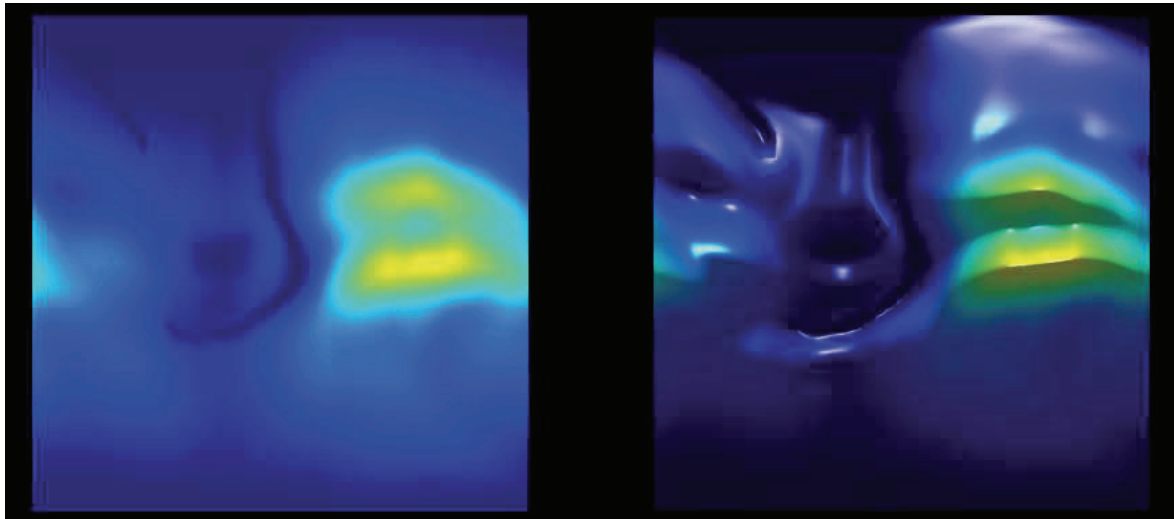
ohne Transparenz-
Informationen

mit Transparenz-
Informationen

Abbildung 17: Transparenzverteilung der Bildmatrizen.

Es wird deutlich, dass die wissenschaftlich wichtigen hohen Elektronenkonzentrationen hervorgehoben werden, während die niedrigen Werte enorm lichtdurchlässig und schwer zu erkennen sind. Bei typisch farbigen Konturen wird dieser Effekt aufgrund des menschlichen Farbempfinden, optisch hellere Farben deutlicher wahrzunehmen, noch verstärkt. Diese Unzulänglichkeit wird durch die Egalisierung auf einen Farbton verhindert, so dass die Transparenzverteilung die Elektronendichteverteilung symbolisiert.

Das Ebenenprinzip sieht vor, mehrere Schichten der Elektronendichteverteilung in Google Earth zu visualisieren. Hierdurch ist die Darstellung de facto auf zwei Dimensionen beschränkt. Um dennoch einen dreidimensionalen Eindruck des visualisieren Cumulus zu erhalten, werden Lichteffekte in der oberen Schicht appliziert (siehe Kap. 4.1.3). Sie simulieren Lichtspiele mit den Konturen der zu darstellenden Elektronendichte (siehe Abb. 18).

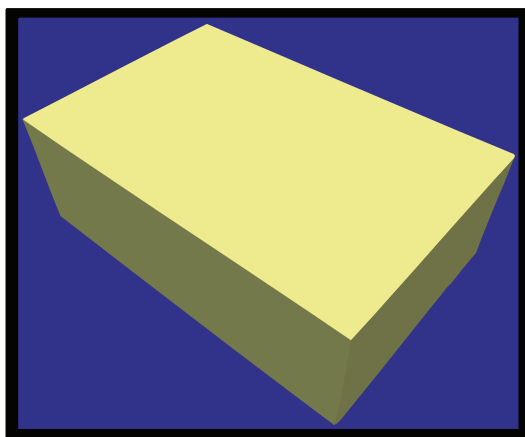


ohne Lichteffekte

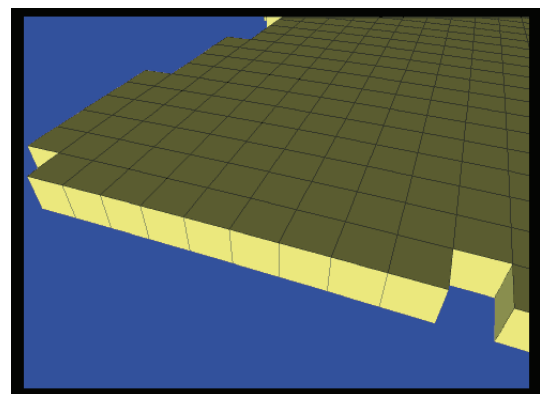
mit Lichteffekte

Abbildung 18: Visualisierung der Lichteffekte.

Nach dem Voxelprinzip werden die Bildelemente in Körper umgewandelt, die ein dreidimensionales Profil haben. Zunächst wird erprobt, ein Raumelement zu konstruieren und zu visualisieren. Die Koordinaten wie auch die Farb- und Transparenzzuweisung sind hierbei unerheblich. Nachdem der Würfel erfolgreich konstruiert ist, kann mit der prozeduralen Verarbeitung der übrigen Bildelement bzw. Voxel fortgesetzt werden. Die geographische Zuordnung ist vom Belang, während die Ausgestaltung der Voxel unbedeutend ist. Die Voxel sind mit schwarzen Kanten hervorgehoben (siehe Abb. 19).



(a) konstruierter Voxel



(b) konstruierte Voxelmenge

Abbildung 19: Voxelkonstruktion.

Eine kombinierte Darstellung aus Transparenz- und Farbzugebung und Konstruktion lässt sich herstellen. Die zugeordneten Farbwerte der Voxel stellen die Elektronendichteverteilung prägnant dar, während die Transparenzwerte als zusätzliche Hilfsmittel fungieren, um die Farben deutlicher abzugrenzen. Die Innenflächen der Voxelmenge

werden, wie zuvor erläutert (siehe 4.1.4), nicht konstruiert. Die Prozeduralisierung der Voxelmenge ist auf den bedeutenden Bereich reduziert (siehe Abb. 20).

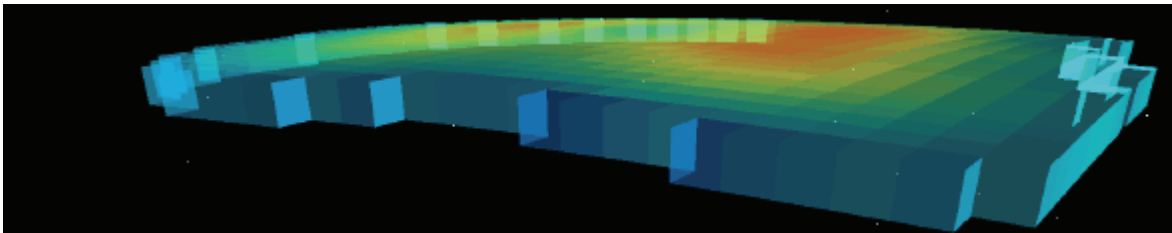


Abbildung 20: Darstellung der modifizierten Voxelmenge (eingeschränkte Ausbreitung).

Die Visualisierungsprodukte erhalten, wie zuvor besprochen (siehe 4.1.5), im Rahmen der Operationalität als Zusatzinformationen die Zeitangaben. Überdies werden zwei verschiedener Ansichten der Beschreibung (Beschreibungskatalog und Informationsdialog) der Produkte hinzugefügt (siehe Abb. 21).

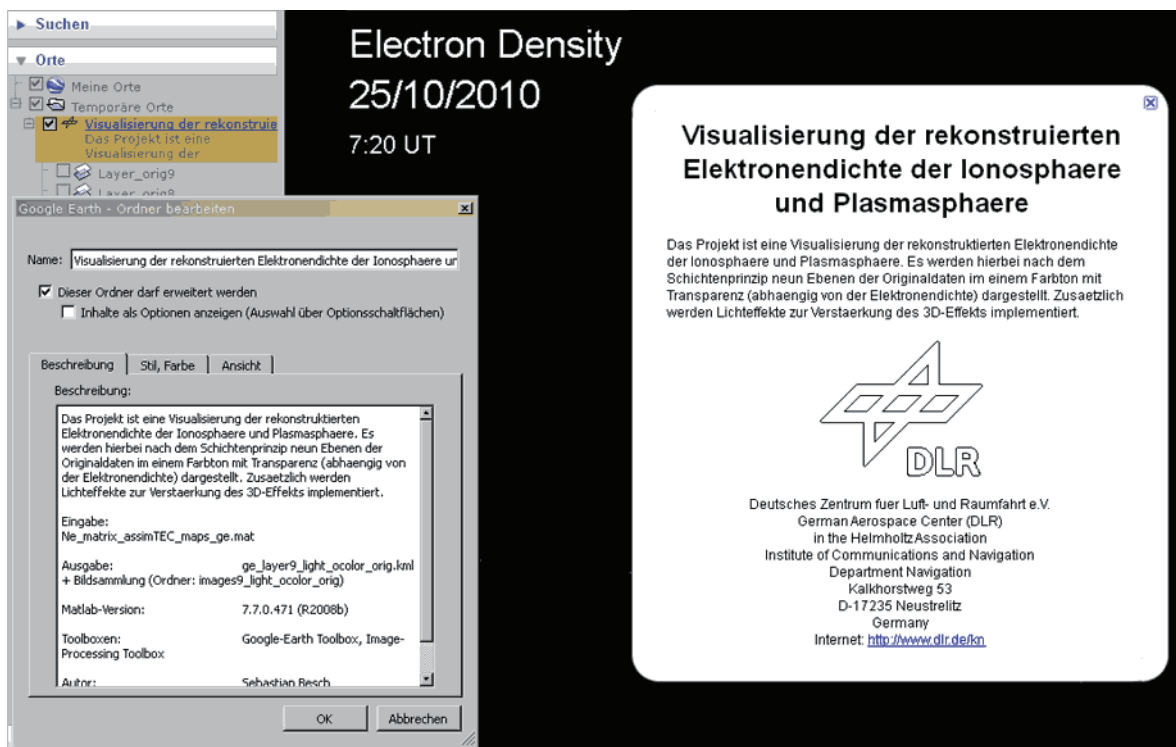


Abbildung 21: Bestandteile des operationellen Betriebs: Zeitangaben, Beschreibungskatalog (links) und Informationsdialog (rechts).

4.3 Auswertung

Eine Bewertung der erzeugten Visualisierungsprodukte ist durchzuführen, um die Charakteristik und die Anwendungsbereiche der umgesetzten Visualisierung festzustellen.

Die Realisierung des Entwurfs visualisierter Ebenen erweist sich als naheliegend und unkompliziert. Jenes Konzept sieht keine komplexen Berechnungen oder Konstruktionen vor, so dass die Implementierung mittels geringer Bordmittel MATLABs und der Google Earth-Toolbox unproblematisch ist, um eine scheinbar dreidimensionale Darstellung mit großer Detailtreue zu verwirklichen. Die Erfahrungen der Umsetzung sind im Allgemeinen kongruent zu der vorherigen Analyse des Konzeptes hinsichtlich der Vor- und Nachteile, lediglich die umgesetzte Modifikation der Transparenz und Farbtabelle erfordert Finesse, um die gewünschte Abstufung und Farbcharakteristik des visualisierten Cumulus zu erhalten. Die optimale Modifikation ist durch iteratives Vergleichen der Ergebnisse jener Realisierung erfasst.

Das Verfahren nach dem Schichtenprinzip ist in der Verarbeitung sehr performant, da der Algorithmus einfach gehalten ist und rechenintensive mathematische Berechnungen ausbleiben. Der Rechenaufwand der Verarbeitung steigt indes bei deutlicher Erhöhung des zuvor erwähnten Skalierungsfaktors der Interpolation (siehe Kap. 4.1.2). Der Skalierungsfaktor wird bei der Modellierung der Lichteffekte beträchtlich erhöht, um eine optimale Visualisierung zu verwirklichen. Aufgrund des Anlegens zusätzlicher Bilddateien, wird eine größere Anforderung bezüglich der Dateihandhabung und des Dateisystems gestellt, welches aufgrund des vorgestellten Lösungsansatzes der Speicherung einer temporären Bilddatei bei aufwendiger Interpolation signifikant ist. Das Visualisierungsprodukte setzt sich neben der Quelltext-Datei aus den PNG-Bilddateien zusammen, die gemeinhin einen geringen Speicherbedarf (z.B. bei Faktor 5 insgesamt 752 KB) aufweisen.

Die Schichten bzw. Bilder werden in Google Earth mit schneller Aufbau- und Verarbeitungsgeschwindigkeit dargestellt, so dass eine problemlose Navigation, z. B. durch die Schichten, ermöglicht wird. Die kritische Grenze des Rechenaufwands jener Darstellung ist abhängig von der verwendeten Hardware. Die Rechenleistung der gegenwärtigen Hardware ist im Allgemeinen ausreichend für die Verarbeitung des Schichtenumfanges der vorliegenden Datengrundlage (9 Schichten). Eine Erhöhung der Schichtenanzahl bzw. Verdichtung des Höhenprofils ist in diesem Zusammenhang unpraktibel, da nur eine marginale optische Verbesserung zu erwarten ist.

Die Verwirklichung des Konzeptes der Voxelmenge stellt sich als ein sehr aufwendiger Sachverhalt heraus. Die obgleich einfache Geometrie-Konstruktion der Raumelemente wird grundsätzlich durch einen komplexen Algorithmus geleistet, der eine große Palette der MATLAB-Grundfunktionen (siehe Kap. 4.1.4) in Anspruch nimmt. Die spezielle

Konstruktionsform mittels der MATLAB-Matrizen, die nach dem Vorgaben der Spezifikation der Google Earth Toolbox erfolgt, sind ad hoc nicht schlüssig. Die anspruchsvoll zu implementierende Modifikation der Voxelmenge (Isolation der Innenflächen) ist nach dem Muster jener Spezifikation ausgerichtet.

Insbesondere die Implementation dieses Konzepts hat beeindruckend die Charakteristik Google Earths, Dreidimensionalität bzw. Räumlichkeit darzustellen, offenbart. Erwartungsgemäß erhält die Visualisierung eine prägnante Optik aufgrund der Voxelkanten. Da der Skalierungsfaktor der Verarbeitung unter Berücksichtigung kurzer Rechenlaufzeit geringer ausfällt, ist der Detailgrad gemindert.

Die Voxelmenge erfordert enormen Rechenaufwand und Arbeitsspeicher, da jede Fläche einzeln verarbeitet und dargestellt wird. Die Rechenlaufzeit verringert sich durch die umfangreiche Reduktion der Voxelmenge, der Separation der Innenflächen und der Begrenzung des Skalierungsfaktors beträchtlich, obgleich sie wesentlich länger im Vergleich zum Schichtenprinzip ist. Da für jedes Polygon ein zusätzliches umfangreiches Marken-Konstrukt in der KML- Datei angelegt wird, benötigt die Quelltext-Datei bei hohem Skalierungsfaktor einen erheblichen persistenten Speicherbedarf (z.B. bei Faktor 6 über 80 MB).

Die Voxel werden in Google Earth bei günstigem Skalierungsfaktor mit befriedigender Verarbeitungsgeschwindigkeit dargestellt, die eine Navigation in der Voxelmenge dennoch gestattet. Der Aufbau der Voxelmenge benötigt verhältnismässig lange Rechenzeit. Eine Optimierung hinsichtlich der Performanz für große Datenmenge (wie das hierbei vorgestellte Raumvolumen) ist erstrebenswert.

Nicht unerwähnt sollen die aufgetretenen Darstellungsfehler der Voxelmenge sein, die unter bestimmter Konstellation der Perspektive eine Interpretation der dargestellten Elektronendichte erschweren, in dem bestimmten Seitenflächen der Voxel fehlerhaft oder gar nicht beleuchtet werden. Grundsätzlich liegt ein Fehler der systemimmanenten Beleuchtung der Polygone Google Earths vor, der sich auch mit Veränderung der Orientierung und somit der Beleuchtung des Polygons nicht beheben lassen. Diesbezügliche Verbesserungen sind bei der Weiterentwicklung Google Earths zu leisten.

	Ebenen	Voxel
Detailgrad	hoch	mittel
Rahmenbedingungen	geringe Anforderungen	hohe Anforderungen
Robustheit	gut	befriedigend (Darstellungsfehler)

Tabelle 4: Charakteristik der Visualisierungsprodukte.

Welcher der Konzepte zu bevorzugen sind, bestimmt ausgehend von den Vor- und Nach-

teile der jeweiligen Technologie hauptsächlich der Anwendungszweck bzw. das System, in der das Visualisierungsprodukt eingesetzt werden soll (siehe Tab. 5).

Geht es um eine kompakte und praktische Darstellungsform, die geringer Anforderung an Speicherung und Rechenaufwand beansprucht, ist das Visualisierungsprodukt nach dem Ebenenprinzip zu bevorzugen. Dieses Konzept stellt somit eine ökonomisch sinnvolle Lösung für den operationellen Betrieb dar. Liegt der Schwerpunkt primär in der dreidimensionalen Modellierung und sind Rahmenbedingungen an Prozessorleistung, Arbeitsspeicher und persistenten Speicher unerheblich, kann das Visualisierungsprodukt der Voxelmenge Verwendung finden.

Überdies kann eine Differenzierung hinsichtlich des Detaillierungsgrads getroffen werden. Sollen eine beachtliche Menge der Informationen visualisiert werden, die gleichwohl nicht deutlich unterscheidbar sind, ist das Ebenenprinzip zu präferieren. Liegt das Interesse vordergründig in einer einprägsamen, klaren, obgleich gröberen Darstellung, ist das Visualisierungsprodukt der Voxelmenge zu bevorzugen. Die Voxelmenge ist eine geeignete Darstellung, um die Ionisierung der Ionosphäre plastisch zu demonstrieren. Die Visualisierung der Voxelmenge ist sinnvoll für weitere Forschungszwecke, da es mehr Möglichkeiten der Erweiterung und Verbesserung der Darstellung gibt.

	Ebenen	Voxel
Operationalität	geeignet	weniger geeignet
Präsentation	geeignet	geeignet
Forschungszweck	weniger geeignet	geeignet

Tabelle 5: Anwendungen der Visualisierungsprodukte.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelten Konzepte der Visualisierung erfüllen die Zielstellung, wissenschaftliche Sachverhalte und Zusammenhänge mittels der Software Google Earth darzustellen. Die Entwürfe erweisen sich als generalisiert, so dass diese für Vorhaben und Erweiterungen anderer Visualisierungsprojekte Verwendung finden können.

Die theoretisch entworfenen Programmkomponenten sind abgesehen von Implementationsdetails direkt und stringent umgesetzt. Unterschiede zwischen Entwurf und Implementation der Komponenten ergeben sich vor allem in der Komplexität bestimmter Programmieraspekte. Exemplarisch sei hier auf die Schnittstellen des Front-Ends der Google Earth-Toolbox verwiesen, deren spezielle Vorgaben der Implementierung zu beachten sind. Die Realisierung der Programmeinheiten stellt sich entgegen der Erwartungen der vorherigen Konzeption als anspruchsvoll heraus.

Die wesentlichen Aspekte des Konzepts der Ebenendarstellung sind gänzlich verwirklicht. Die prinzipielle algorithmische Vorgehensweise kann durch Feinheiten in der Darstellung optimiert werden. Als maßgebliche Detailverbesserung ist die Erhöhung der Anzahl der Bildelemente für jede Dimension zu nennen. Ein wahrnehmbaren Unterschied ist bei der Erzeugung der Lichteffekt zu erkennen, während die verbleibenden Ebenen ohne Beleuchtung kaum von zusätzlicher Interpolation profitieren. Das Höhenprofil der Schichtung der Oberflächen kann durch zusätzlich generierte Ebenen verfeinert werden, so dass das simulierte Volumen geschlossener ist. Letztendlich besteht die Möglichkeit, die Transparenzinformation für jeden RGB-Farbkanal zu erweitern, um eine marginale Verbesserung in der Abstufung der Transparenzverteilung zu ermöglichen.

Die deutlich umfangreichere Realisierung der Voxelmenge offenbart Verbesserungsmöglichkeiten im Algorithmus. Um die Generierung dieses Visualisierungsproduktes deutlich homogener zu gestalten, kann ein Ausschließen der Ober- und Unterseitenflächen durch eine aufwändige Implementation realisiert werden. Lediglich die gesamten Unterseitenflächen werden im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen. Vergleichbar mit dem Ebenenkonzept, kann durch zusätzliche Erhöhung der Pixelanzahl bzw. Voxel jeder

Dimension die Darstellung detailliert werden.

Die Visualisierungsprodukte können im operationellen Betrieb als temporäre Produkte einer Animation bzw. eines Videos fungieren, um längerfristige Phänomene der Ionosphäre und Plasmasphäre zu veranschaulichen.

Die genannten Konzepte lassen sich durch neue Erwägungen in der Darstellung erweitern. Umfangreiche Statistiken können mithilfe der MATLAB Google Earth-Toolbox als Ergänzung zu den Visualisierungen erstellt werden, so dass die Darstellungen um statistische Beschreibungen des Sachverhaltes ergänzt werden. Die komplexe Software Google Earth bietet neben der Möglichkeit der aufgezeigten Dreidimensionalität eine Vielzahl an Navigationsmöglichkeiten. Vorstellbar sind sogenannte Flugrouten, die virtuelle Flüge automatisch durch die Ionosphäre und Plasmasphäre erlauben. Hierdurch lässt sich der Kommunikationsweg zwischen Satelliten, der die Messwerte der Visualisierung liefert, und Erde darstellen und nachverfolgen (siehe Abb. 22).

Die Software Google Earth wird stetig weiterentwickelt. Neben den angesprochenen Verbesserungsvorschläge zur Optimierung der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Visualisierungsprodukte und Korrektur von Ausgabefehlern bestimmter geometrischer Formen sind in diesem Kontext zusätzliche Erweiterungen in Informationsaufbereitung, Navigation und Satellitendarstellung in der Entwicklung Google Earths vorstellbar.



Abbildung 22: Flugroute zwischen Satelliten und Erde

Anhang A

Google Earth: Visualisierungen

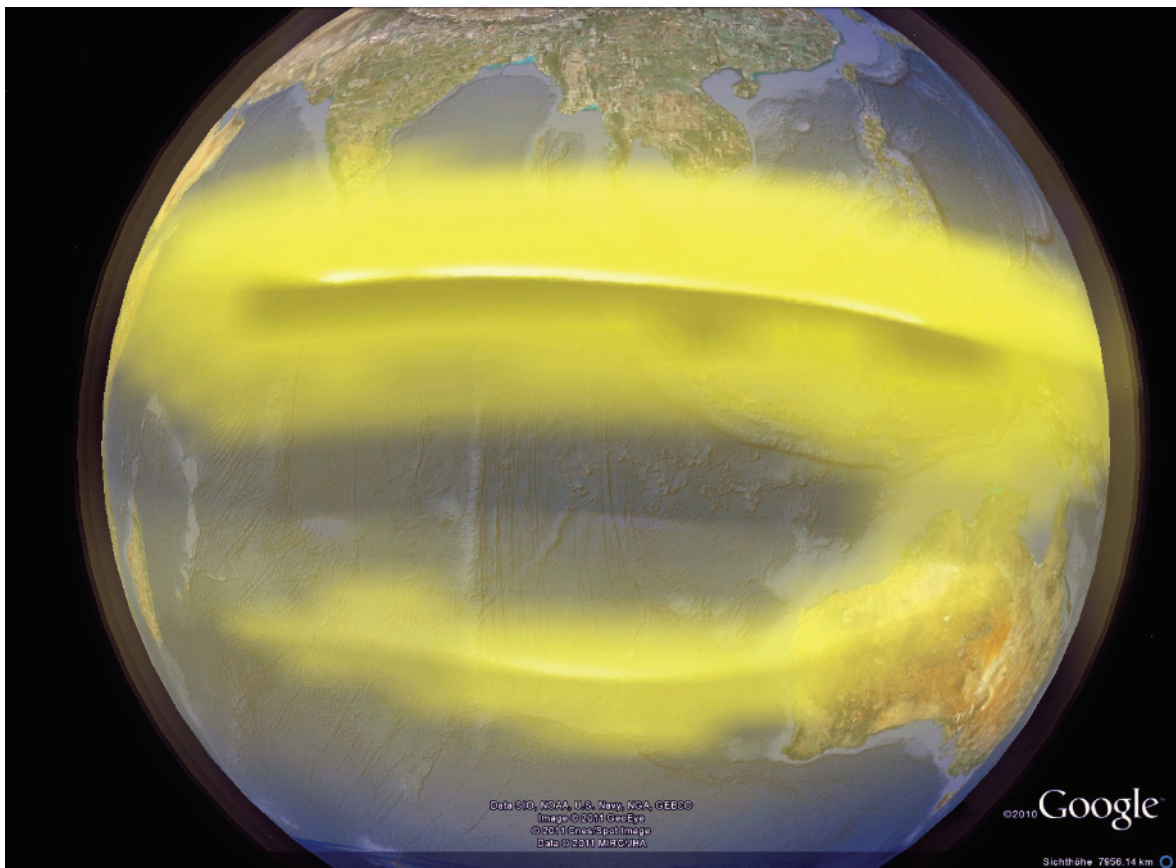


Abbildung 23: Schichten in Google Earth (kleiner Maßstab)

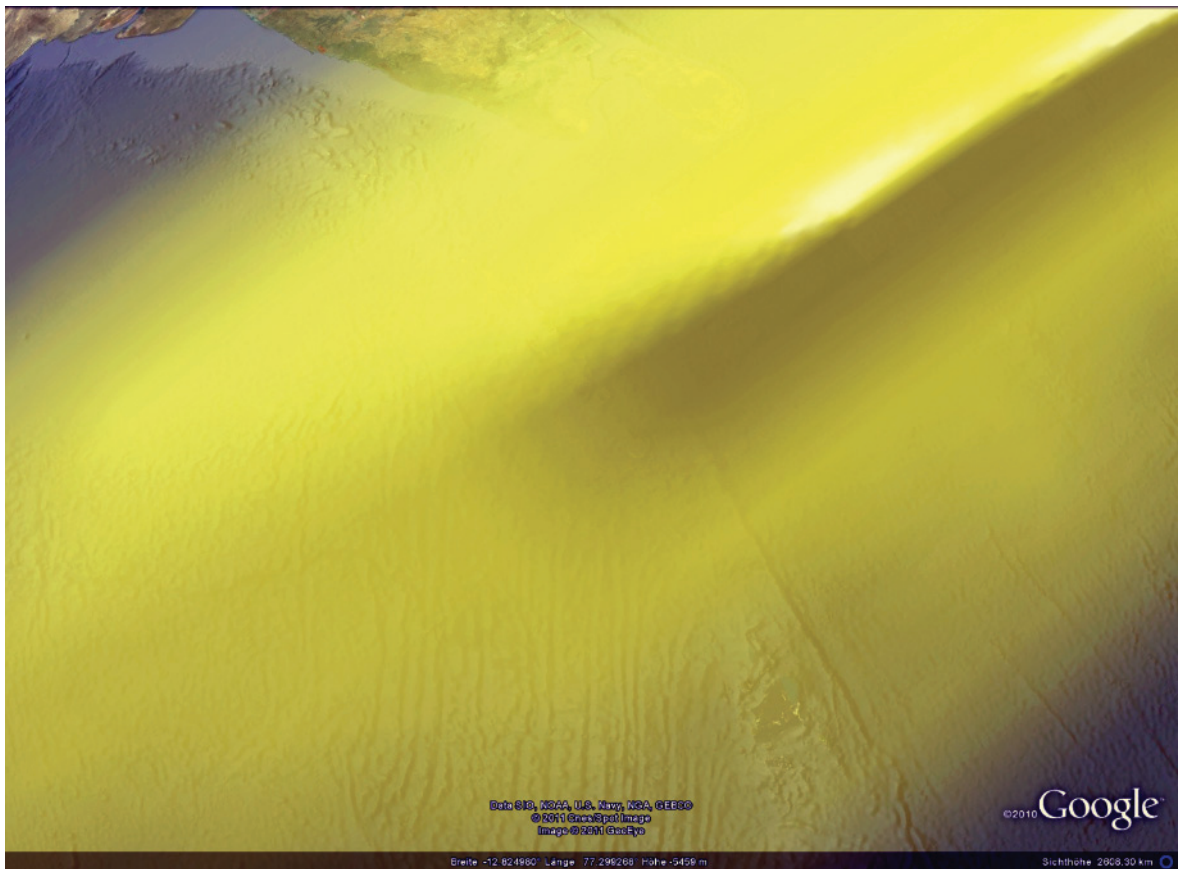


Abbildung 24: Schichten in Google Earth (mittlerer Maßstab)

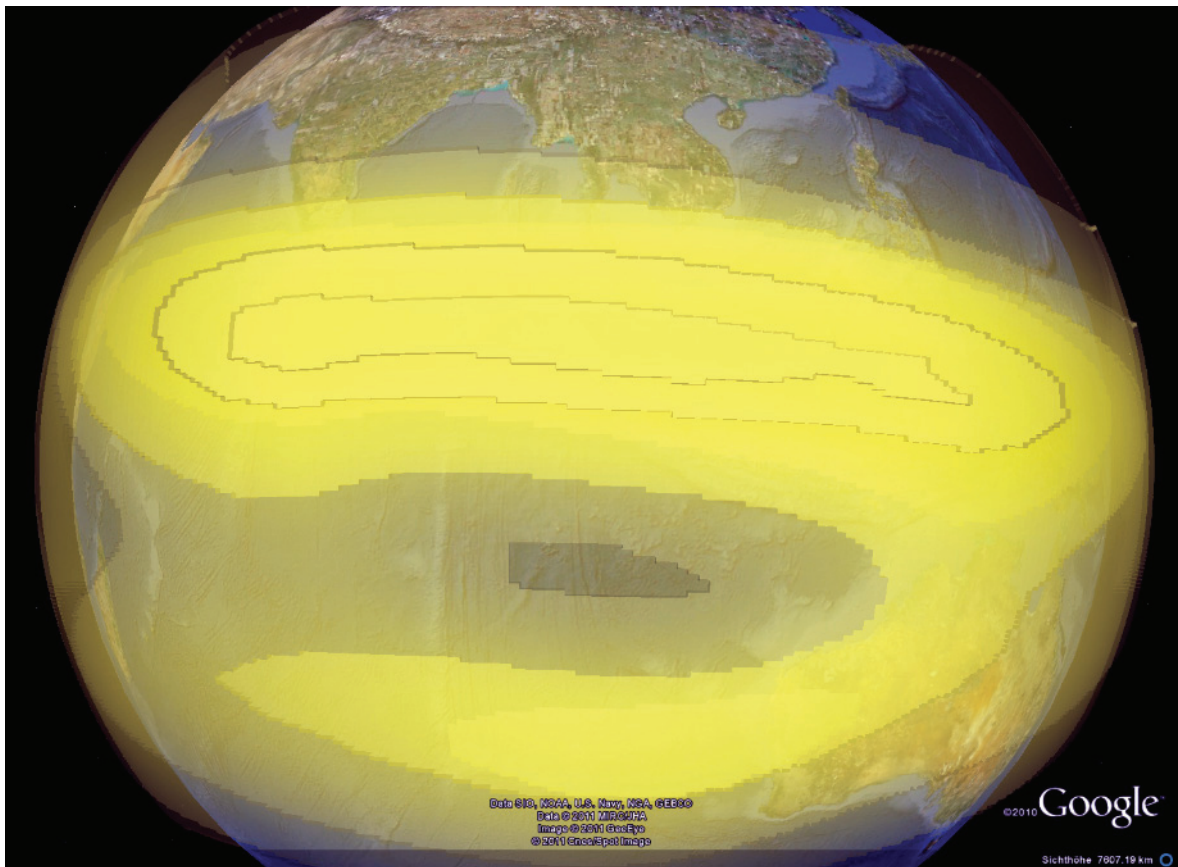


Abbildung 25: Voxelmenge in Google Earth (kleiner Maßstab)

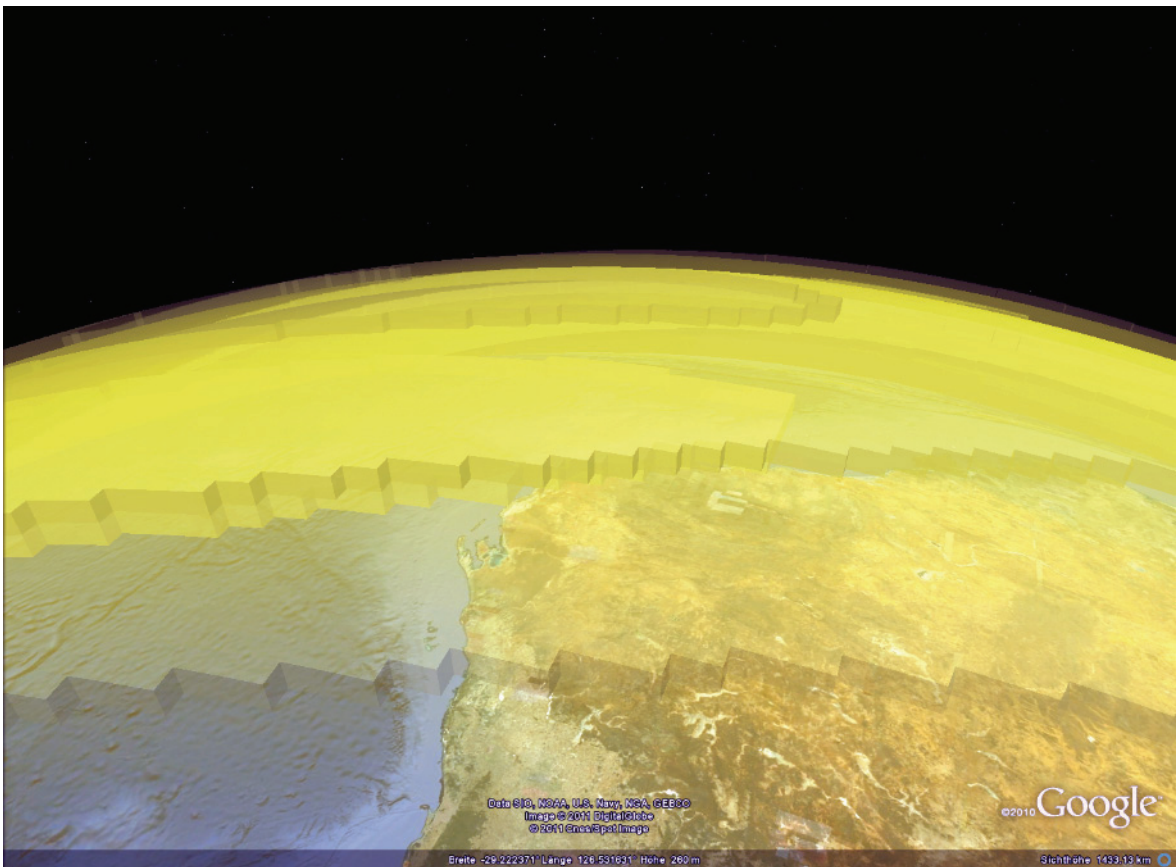


Abbildung 26: Voxelmenge in Google Earth (mittlerer Maßstab)

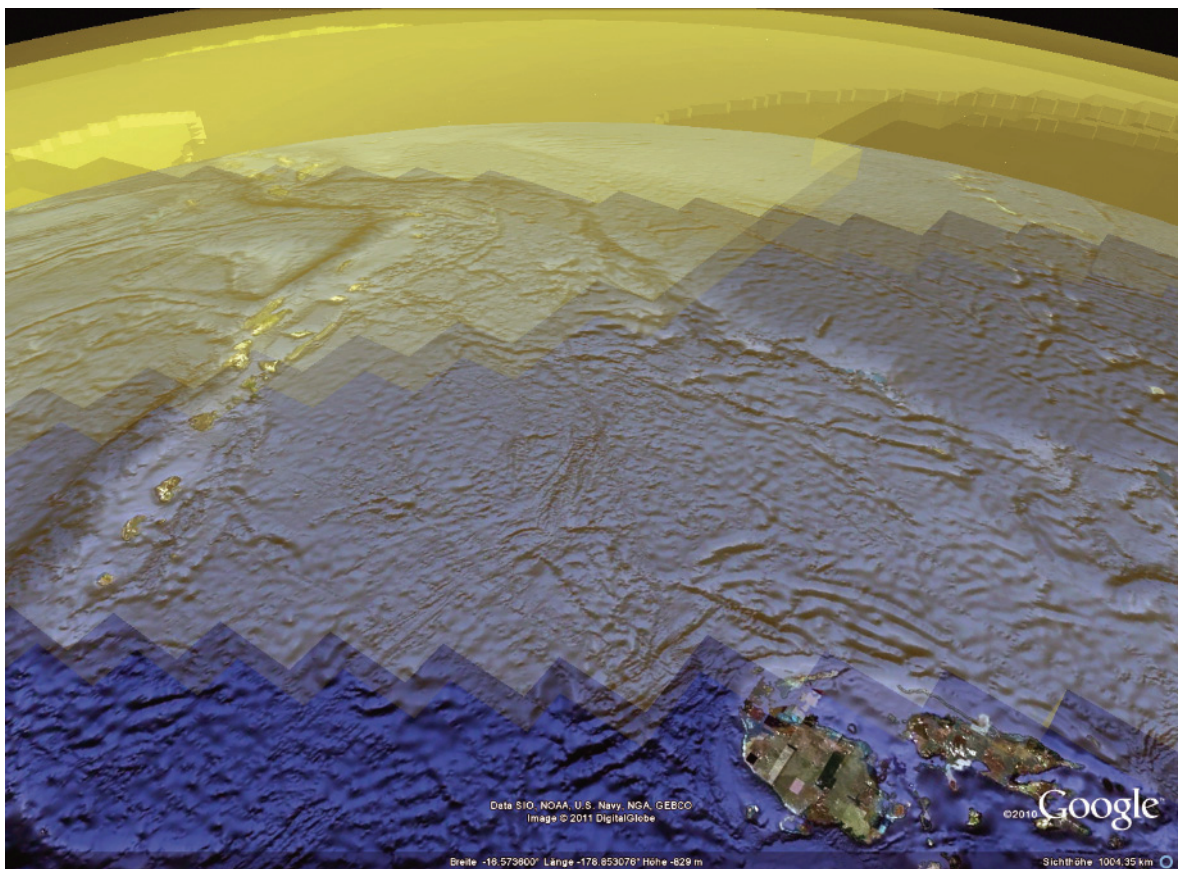


Abbildung 27: Voxelmenge in Google Earth (hoher Maßstab)

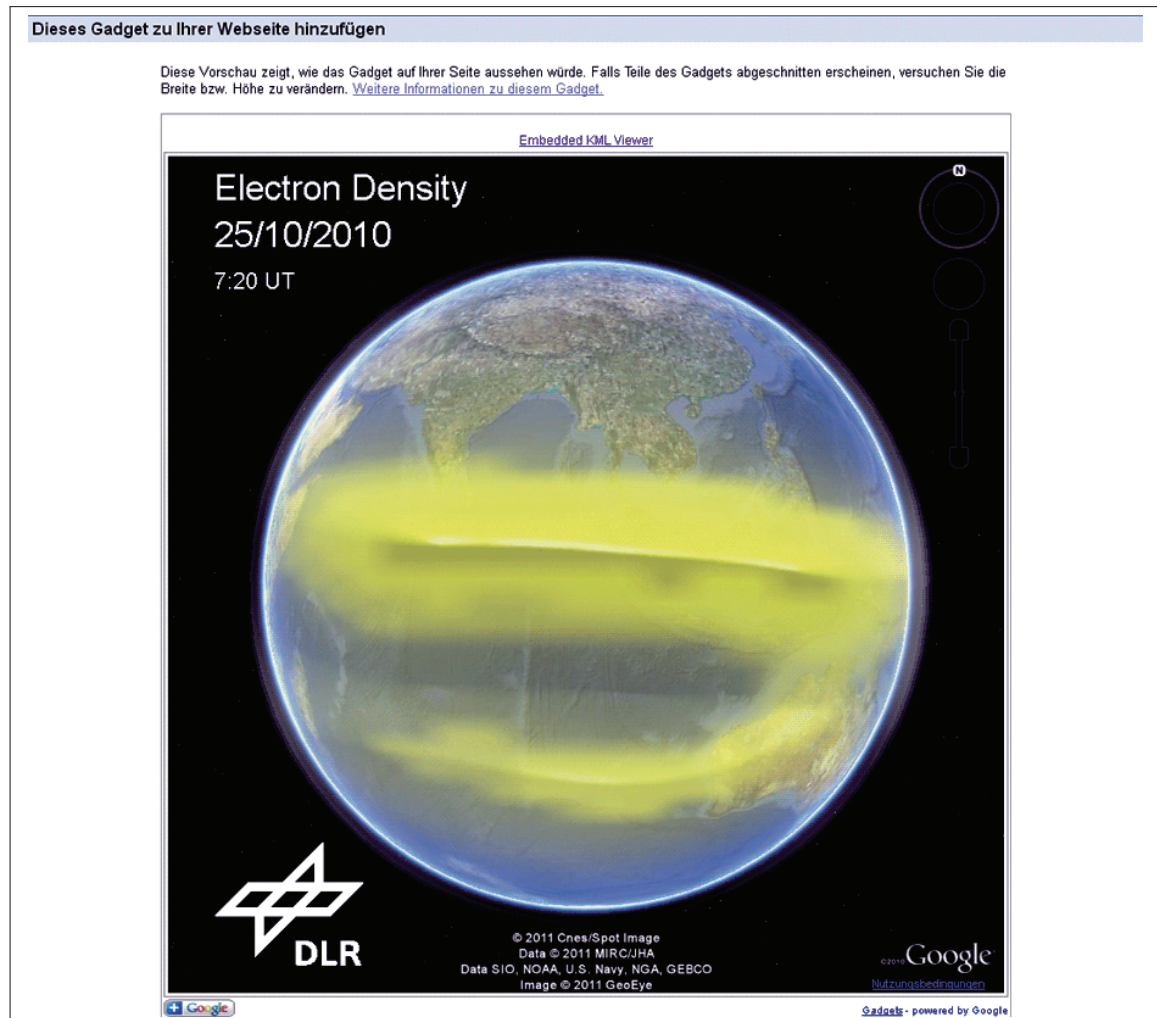


Abbildung 28: Integration des operationellen Produkts als Online-Gadget (Java-Script) nach GOOGLE (2007b)

Literaturverzeichnis

- ANDERSON, DAVE ; FULLER-ROWELL, TIM (1999). *The Ionosphere*. Space Environment Topics.
- BAUER, MANFRED (1994). *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. Wichmann- Verlag, Heidelberg, 3. Auflage.
- DLR (2011). *SWACI- Produkte*. Website. Verfügbar unter <http://swaciweb.dlr.de/daten-und-produkte/>, besucht am 25.07.2011.
- FRIENDLY, MICHAEL (2009). *Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics, and data visualization*. Verfügbar unter <http://www.math.yorku.ca/SCS/Gallery/milestone/milestone.pdf>, besucht am 24.08.2011.
- GERZEN, TATJANA (2010a). *Electron Density Layers*. Website. Verfügbar unter <http://swaciweb.dlr.de/fileadmin/scripts/shop/onestopshopping.php>, besucht am 25.07.2011.
- GERZEN, TATJANA (2010b). *NmF2 Reconstructed*. Website. Verfügbar unter <http://swaciweb.dlr.de/fileadmin/scripts/shop/onestopshopping.php>, besucht am 25.07.2011.
- GERZEN, TATJANA; WILKEN, VOLKER; JAKOWSKI, NORBERT ; HOQUE, MAINUL (2011). *Reconstruction of the ionospheric 3D electron density distribution based on operational TEC estimations*. Referat. <http://www.egu.eu>.
- GOOGLE (2007a). *Google Earth User Guide*. Google Incorporated. Verfügbar unter http://earth.google.com/userguide/v4/google_earth_user_guide.pdf, besucht am 01.08.2011.
- GOOGLE (2007b). *Google Gadgets für Ihre Webseite - KML Viewer*. Website. Verfügbar unter <http://www.gmodules.com/ig/creator?synd=open&url=http://code.google.com/apis/kml/embed/embedkmlgadget.xml>, besucht am 22.08.2011.
- HECK, BERHARD (1995). *Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung*. Wichmann- Verlag, Heidelberg, 2. Auflage.

- HEISE, STEFAN (2002). *Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen*, Freie Universität Berlin.
- HILBERT, DAVID ; COHN-VOSSEN, STEPHAN (2011). *Anschauliche Geometrie*. Springer- Verlag, Heidelberg, 2. Auflage.
- JACOBS, SAS (2006). *Beginning XML with DOM and Ajax - From Novice to Professional*. Apress- Verlag, Berkeley, 1. Auflage.
- JAKOWSKI, NORBERT (2011). *Ionosphärische Effekte und Korrekturen*. Website. Verfügbar unter http://www.dlr.de/kn/desktopdefault.aspx/tabid-4796//7953_read-12812/, besucht am 24.07.2011.
- JÄHNE, BERND (2002). *Digitale Bildverarbeitung*. Springer- Verlag, Heidelberg, 5. Auflage.
- KAUFMAN, A.; COHEN, D. ; YAGEL, R. (1993). *Volume Graphics*. IEEE Computer, 26:51–64. Verfügbar unter <http://www.cs.sunysb.edu/~vislab/projects/volume/Papers/Voxel/index.html>, besucht am 30.07.2011.
- KUNITSYN, VIACHESLAV E. ; TERESHCHENKO, EVGENY D. (2003). *Ionospheric Tomography*. Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage.
- MATLAB (2007). *Mathworks Product Overview*. Website. Verfügbar unter http://www.mathworks.de/products/pfo/#ml_main, besucht am 06.08.2011.
- MATLAB (2011). *Face and Edge Lighting Methods*. Dokumentation. Verfügbar unter <http://www.mathworks.com/help/techdoc/visualize/f1-44962.html>, besucht am 12.08.2011.
- NITSCHKE, MARTIN (2005). *Geometrie - Anwendungsbezogene Grundlagen und Beispiele*. Carl Hanser- Verlag, München, 1. Auflage.
- RATCLIFF, JOHN A. (1974). *Sonne, Erde, Radio - Die Erforschung der Ionosphäre*. Fischer Taschenbuchverlag, München, 2. Auflage.
- SCHUNK, ROBERT W. ; NAGY, ANDREW F. (2009). *Ionospheres - Physics, Plasma Physics and Chemistry*. Cambridge University Press, Cambridge, 2. Auflage.
- SPAACKS, JURRIAN H. ; DAVIS, SCOTT L. (2007a). *Google Earth Toolbox Contents*. Verfügbar unter http://www.mathworks.com/matlabcentral/fox_files/12954/4/content/googleearth/html/contents.html, besucht am 06.08.2011.

- SPAAKS, JURRIAAN H. ; DAVIS, SCOTT L. (2007b). *Google Earth Toolbox Tutorial*. Verfügbar unter http://googleearthtoolbox.googlecode.com/svn-history/r2/trunk/doc/Google_Earth_Toolbox_tutorial.pdf, besucht am 06.08.2011.
- TARANTOLA, ALBERT (2005). *Invers Problem Theory*. SIAM- Verlag, Philadelphia, 1. Auflage.
- TOMLIN, D. (1990). *Geographic information systems and cartographic modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1. Auflage.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, 29. August 2011

Sebastian Besch