

7 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die mit dem vorgestellten Assimilationsverfahren unter Verwendung von CHAMP-GPS-Daten rekonstruierten Elektronendichteverteilungen anhand konkreter Beispiele präsentiert. Weiterhin werden erste Ergebnisse der Validierung mit unabhängigen Elektronendichtemessungen vorgestellt, die eine qualitative Einschätzung der erhaltenen Resultate ermöglichen (siehe auch *Heise et al.*, 2002a, 2002b).

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die vorgestellten Verfahren, Methoden und Algorithmen zur Ableitung dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen aus den CHAMP-GPS-Messungen als das eigentliche Ergebnis der vorliegenden Arbeit zu betrachten sind. In diesem Kapitel sollen die prinzipielle Eignung der entwickelten Verfahren sowie die daraus resultierenden Möglichkeiten zur Beobachtung der Ionosphäre und Plasmasphäre aufgezeigt werden. Die eigentliche Beobachtung und Diskussion ionosphärischer und plasmasphärischer Phänomene basierend auf dem beschriebenen Verfahren sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein und erst im Anschluss an eine umfassendere Validierung unter Verwendung weiterer unabhängiger Ionosphären-daten erfolgen.

7.1 Ergebnisse der Datenassimilation

Das Resultat des vorgestellten Assimilationsverfahrens besteht aus einer globalen dreidimensionalen Elektronendichteverteilung, die den gesamten Raum zwischen CHAMP- und GPS-Orbithöhe umfasst. Die Elektronendichtewerte liegen dabei im Rahmen der in Kapitel 6.1 beschriebenen Voxel-Struktur vor, deren räumliche Auflösung folglich mit der des Assimilationsergebnisses identisch ist. Die Zuordnung der Elektronendichten zu den jeweiligen geographischen Orten (charakterisiert durch Länge, Breite und Höhe) erfolgt mittels der in Kapitel 6.1.2 angegebenen Transformationsbeziehungen.

Bei der Assimilation der CHAMP-TEC-Daten jeweils eines Umlaufs ist aufgrund der vorliegenden Beobachtungsgeometrie anschaulich klar, dass das Maximum der Datenbedeckung und damit auch der maximale Einfluss des Assimilationsprozesses auf die initiale Modellannahme im Bereich der jeweiligen Orbitebene liegt. Andere Bereiche der global angelegten Voxel-Struktur bleiben dagegen durch den Assimilationsprozess völlig unbeeinflusst und enthalten schließlich die unveränderte Anfangsannahme des Modells. Dies wird auch bei Betrachtung von Abb. 7.4 (rechts) deutlich. Es ist also zu erwarten, dass die Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung im Bereich der CHAMP-Orbitebene ihre höchste Genauigkeit erreicht. Daher ist es zweckmäßig, zur Veranschaulichung der rekonstruierten Elektronendichteverteilung einen meridionalen Schnitt durch die Voxel-Struktur entlang der jeweiligen Orbit-Ebene zu betrachten. Abb. 7.1 zeigt einen solchen Schnitt für ein konkretes Assimilationsbeispiel und vermittelt einen Eindruck des Assimilationsergebnisses im Bereich der CHAMP-Orbitebene. Die Lokalzeit für den westlichen Teil der Schnittebene liegt etwa bei 14 Uhr und im östlichen Teil bei etwa 2 Uhr. Die Ionisationsunterschiede zwischen der nachmittäglichen und der nächtlichen Ionosphäre und Plasmasphäre im Westen bzw. Osten sind dabei deutlich zu erkennen. Ein Vergleich der polaren Bereiche beider Hemisphären zeigt klare Unterschiede. Wie zu erwarten ist, weist die im Polartag ständig der ionisierenden Sonneneinstrahlung ausgesetzte südliche Ionosphäre höhere Elektronendichten auf als die nördliche Ionosphäre im Bereich der Polarnacht.

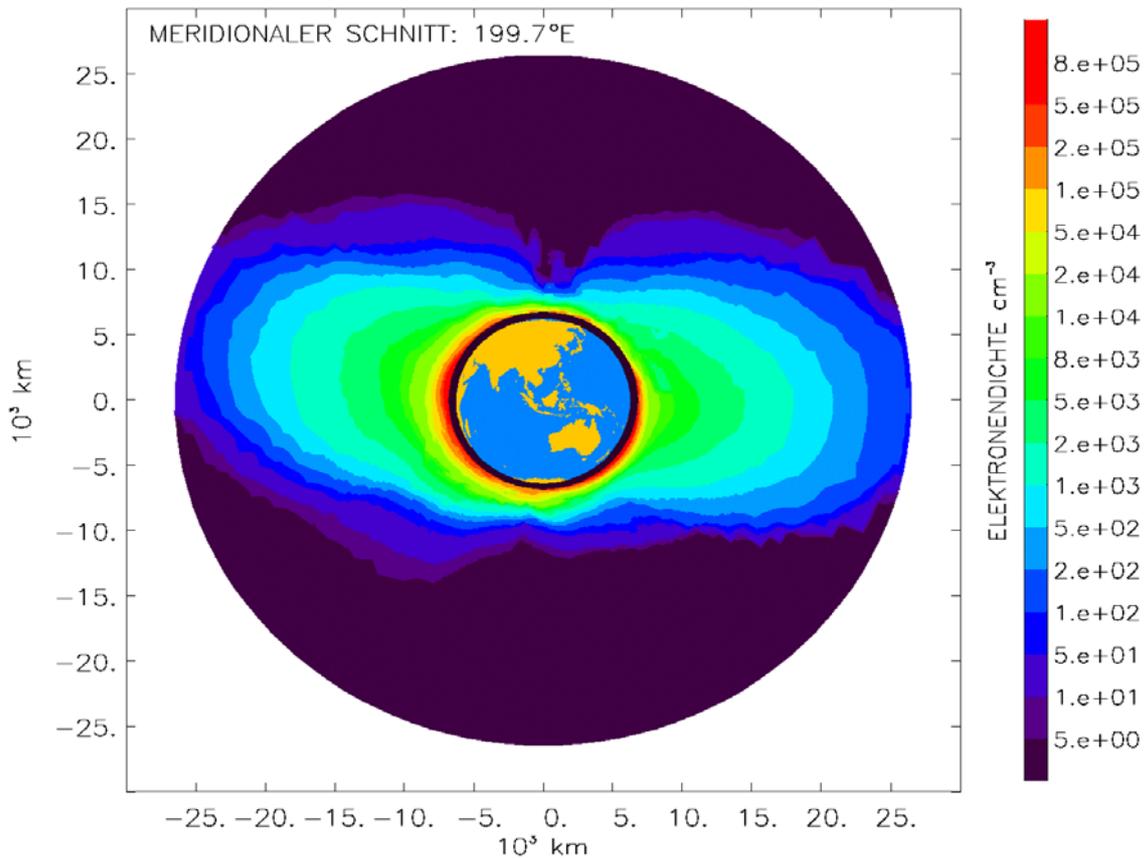


Abb. 7.1: Zweidimensionale Darstellung der rekonstruierten Elektronendichteverteilung im Bereich der CHAMP-Orbitebene nach Assimilation der TEC-Messungen eines vollen Umlaufs. Beispiel vom 21. 12. 2001, meridionaler Schnitt entlang 199,7°E, Beginn der Assimilation: 12:27 UTC, Dauer: 93 min.

Abb. 7.2 links zeigt die prozentuale Abweichung der Elektronendichteverteilung aus Abb. 7.1 von der in diesem Fall verwendeten initialen Annahme des PIM. Bemerkenswert hohe Abweichungen des Assimilationsergebnisses vom Ausgangsmodell zeigen sich dabei in verschiedenen Bereichen der Plasmapausenregion. Dies kann als eine Korrektur der vom Modell angenommenen Plasmapausenposition durch den Assimilationsprozess gewertet werden.

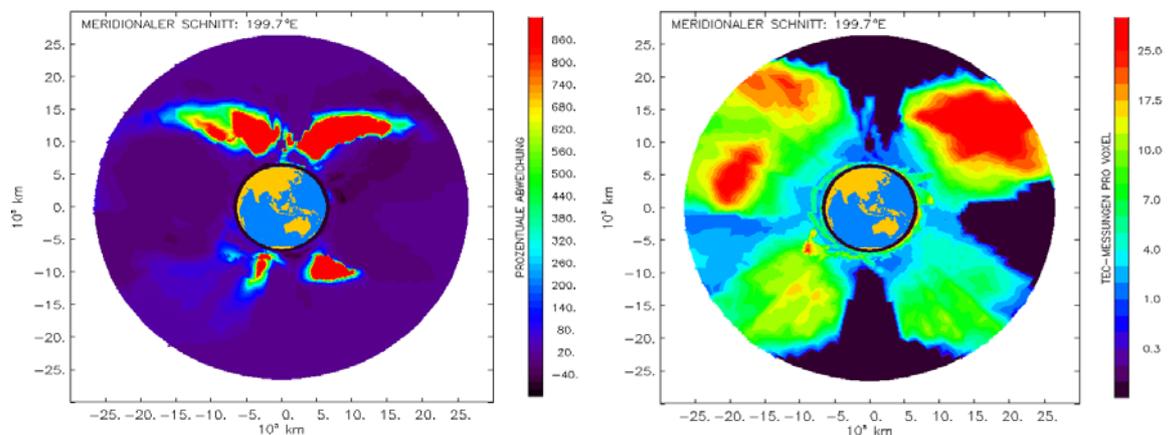


Abb. 7.2: links: Prozentuale Abweichung des Assimilationsergebnisses von der initialen Modellannahme (PIM). rechts: Datenbedeckung (Strahlendichte in TEC-Messungen pro Voxel), korrespondierend zu Abb. 7.1.

Zur Einschätzung des Assimilationsergebnisses an einem bestimmten Punkt innerhalb der Voxel-Struktur ist es hilfreich, Informationen über die Datenbedeckung bzw. die Anzahl der TEC-Messungen abzuleiten, deren Einfluss der resultierende Elektronendichtewert innerhalb eines bestimmten Voxels unterliegt. In diesem Sinne kann die Strahlendichte als eine zur Elektronendichte korrespondierende Größe eingeführt werden. Diese Strahlendichte ist dabei in ähnlicher Weise wie die Elektronendichte selbst abzuleiten: Zunächst wird jedes Voxel mit der Anzahl der Strahlen, von denen es durchquert wird, initialisiert. Damit ist die Strahlendichte in den tatsächlich durchquerten Voxeln bekannt. Der Einfluss dieser durchquerten Voxel auf deren Umgebung kann nun konstruiert werden, indem die in Kapitel 6.2.3 beschriebene abschließende gewichtete Einflussnahme analog zur Voxel-Struktur der Elektronendichte auch auf die Voxel-Struktur der Strahlendichte angewendet wird. Abb. 7.2 rechts zeigt die zweidimensionale Darstellung der so abgeleiteten Strahlendichte entlang der CHAMP-Orbitebene korrespondierend zum Assimilationsergebnis in Abb. 7.1.

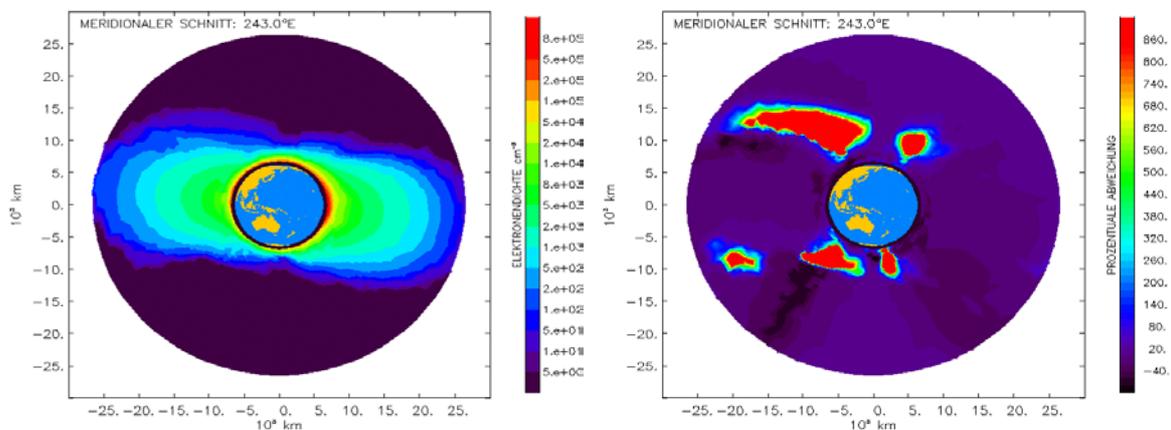


Abb. 7.3: Assimilationsbeispiel vom 09. 08. 2001, meridionaler Schnitt entlang 243°E, Beginn der Assimilation: 21:56 UT, Dauer: 93 min. **links:** zweidimensionale Darstellung der rekonstruierten Elektronendichteverteilung im Bereich der CHAMP-Orbitebene. **rechts:** Prozentuale Abweichung des Assimilationsergebnisses von der initialen Modellannahme (PIM).

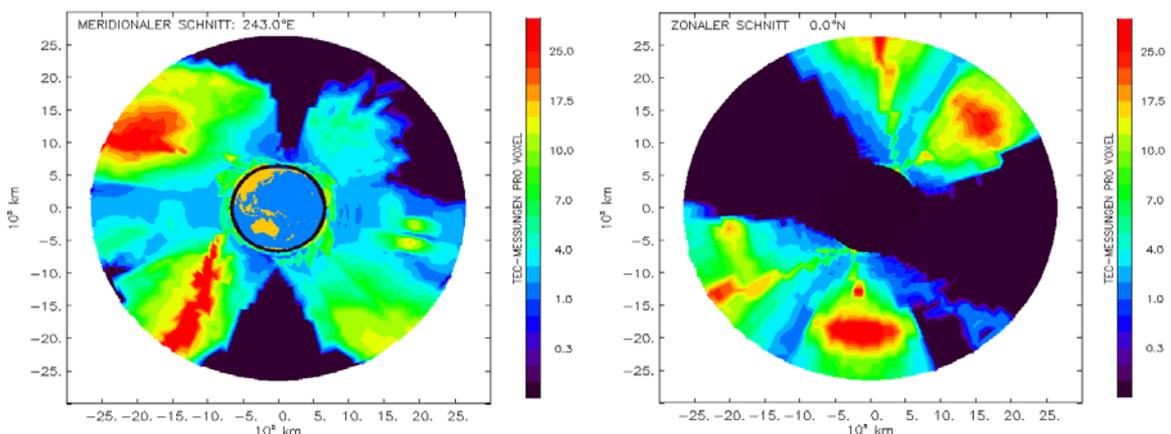


Abb. 7.4: **links:** Strahlendichte im Bereich der CHAMP-Orbitebene. **rechts:** Strahlendichte im Bereich der Äquatorialebene, korrespondierend zu Abb. 7.3.

Abb. 7.3 illustriert ein weiteres Assimilationsbeispiel. Die Lokalzeit für den westlichen Teil der Schnittebene liegt hier bei etwa bei 3 Uhr und im östlichen Teil bei etwa 15 Uhr. Die Ionisationsunterschiede zwischen lokalzeitlicher Tag- und Nachtseite der gezeigten Schnittebene (Abb. 7.3 links) sind wie in Abb. 7.1 deutlich sichtbar. Im Gegensatz zu Abb.

7.1 zeigt Abb. 7.3 links eine rekonstruierte Elektronendichteverteilung zur Zeit des nordhemisphärischen Sommers. Wie für diesen Fall zu erwarten ist, weist die Ionosphäre der hohen Breiten auf der Nordhalbkugel einen höheren Ionisationsgrad auf als die polare Ionosphäre der Südhalbkugel.

Ein Vergleich der relativen Abweichungen von der initialen Modellannahme (Abb. 7.2 links und Abb. 7.3 rechts) zeigt prinzipielle Gemeinsamkeiten: Die mit Abstand stärksten Abweichungen treten jeweils in der Plasmapausenregion auf. Da die Elektronendichte im Bereich der Plasmapause um Größenordnungen variiert (siehe Abb. 2.6 links), ist auch leicht nachvollziehbar, dass eine Korrektur der modellierten Plasmapausenposition durch den Assimilationsprozess derartig hohe relative Abweichungen hervorrufen kann. Vergleicht man die relativen Abweichungen mit den korrespondierenden Darstellungen der Strahlendichte (Abb. 7.2 rechts und Abb. 7.4 links), so kann festgestellt werden, dass keine Korrelation zwischen der Höhe der Strahlendichte und der Intensität der relativen Änderungen sichtbar ist, d.h. die Höhe der relativen Änderungen des Ausgangsmodells ist, sofern eine Datenbedeckung vorliegt, weitgehend unabhängig von der Strahlendichte. Bei eher gleichmäßiger Datenbedeckung fallen die relativen Änderungen in der Plasmapausenregion bezüglich Intensität und Form der veränderten Gebiete sehr unterschiedlich aus. Dies kann als sicheres Indiz dafür gewertet werden, dass die starken relativen Änderungen in der Plasmapausenregion nicht als Eigenschaft des verwendeten Assimilationsverfahrens zu betrachten sind, sondern auf tatsächlich in den TEC-Messungen enthaltenen Informationen beruhen.

Ein Vergleich der Strahlendichten in der CHAMP-Orbitebene (Abb. 7.2 rechts und Abb. 7.4 links) zeigt ebenfalls prinzipielle Gemeinsamkeiten: Erwartungsgemäß liegen relativ hohe Strahlendichten in der Nähe der CHAMP-Flugbahn vor, da sich die Strahlen jeweils eines Messzeitpunktes am Ort des Satelliten in einem Voxel schneiden. Interessanterweise treten aber die höchsten Strahlendichten in der Nähe der GPS-Orbithöhe auf. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die GPS-Satelliten mit ihrer etwa 12-stündigen Umlaufzeit während eines CHAMP-Orbits als quasi stationär betrachtet werden können. Daher kommt es in der Nähe der GPS-Satelliten zwangsläufig zu hohen Strahlendichten. Andererseits trägt auch das vergleichsweise große Voxel-Volumen im Bereich der GPS-Flughöhe zu den hohen Strahlendichten bei. Die fehlende Datenbedeckung in größeren Höhen über den polaren Bereichen, welche in beiden gezeigten Beispielen deutlich zu Tage tritt, ist auf die Inklination der GPS-Orbitebenen von jeweils 55° zurückzuführen und kann daher für die vorliegende Beobachtungsgeometrie generell erwartet werden. Auch die sich in beiden betrachteten Fällen andeutenden relativen Minima der Datenbedeckung im äquatorialen Bereich sind anschaulich durch die Konstellation der GPS-Orbitebenen zu begründen.

Abb. 7.4 rechts zeigt schließlich einen zonalen Schnitt durch die Voxel-Struktur der Strahlendichte entlang des geographischen Äquators. Die Lage der CHAMP-Orbitebene ist deutlich identifizierbar. Weiterhin wird eindrucksvoll bestätigt, was aufgrund der vorliegenden Beobachtungsgeometrie anschaulich klar erscheint: Der maximale Einfluss des Assimilationsprozesses auf die initiale Modellannahme liegt im Bereich der jeweiligen Orbitebene, während Gebiete in deutlicher Entfernung zur Orbitebene durch den Assimilationsprozess völlig unberührt bleiben.

7.2 Validierung rekonstruierter Elektronendichteverteilungen mit unabhängigen ionosphärischen Daten

Die Validierung der rekonstruierten Elektronendichteverteilungen ist aufgrund des Mangels an Elektronendichtedaten insbesondere im Bereich der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre ein schwieriges Unterfangen. Wie in Kapitel 2.7 erläutert wurde, können diese Validierungsdaten prinzipiell auf in-situ-Messungen beruhen oder durch verschiedene Fernerkundungsverfahren gewonnen werden. Dabei besteht generell das Problem der zeitlichen und räumlichen Koinzidenz zwischen möglichen Validierungsdaten und den CHAMP-Messungen, d.h., die unabhängigen Messungen sollten in möglichst geringem Abstand zur CHAMP-Orbitebene liegen und müssen innerhalb des jeweiligen Orbitzeitraumes gemessen worden sein. Aufgrund dieser notwendigen Einschränkungen reduzieren sich die Validierungsmöglichkeiten basierend auf bodengebundene Fernerkundungsverfahren wie dem Incoherent-Scatter-Radar oder der Ionosonde im Prinzip auf Einzelfallbetrachtungen, wie sie in den Kapiteln 7.2.2 und 7.2.3 exemplarisch aufgeführt werden. Die einzigen derzeit zur Validierung verfügbaren in-situ-Messungen sind die Elektronendichtedaten basierend auf den Messungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP (siehe Kapitel 3.2.2). Hierzu werden im folgenden Kapitel nähere Ausführungen gemacht.

7.2.1 Messungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP

Die in-situ-Elektronendichtemessungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP bieten eine hervorragenden Möglichkeit zur umfassenden Validierung der durch die Assimilation abgeleiteten Elektronendichteverteilungen entlang der CHAMP-Flugbahn, da die zeitliche und räumliche Koinzidenz der Messungen a priori gegeben ist und somit eine große Menge sehr zuverlässiger Validierungsdaten zur Verfügung steht.

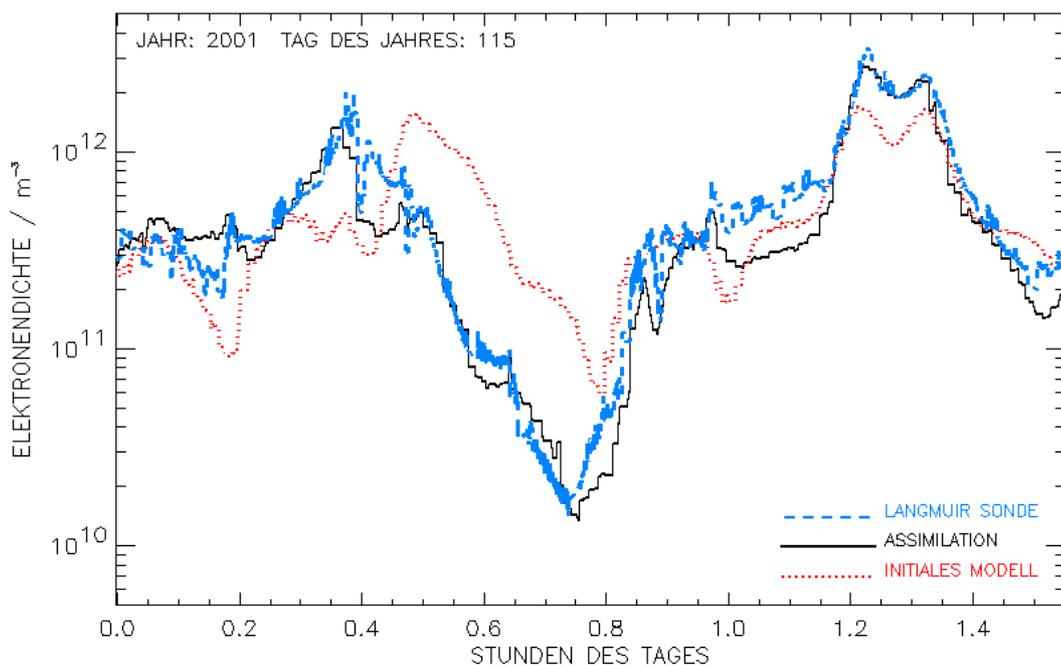


Abb. 7.5: Elektronendichtevergleich zwischen Langmuir-Sonde, Assimilation und initialer Modellannahme entlang der CHAMP-Flugbahn für einen konkreten Umlauf am 25. April 2001.

Abb. 7.5 zeigt anhand eines Vergleiches zwischen den Messungen der Langmuir-Sonde sowie dem Assimilationsergebnis und der initialen Modellannahme entlang der CHAMP-Flugbahn für einen bestimmten Orbit, wie die initiale Modellannahme durch den Assimilationsprozess so verändert wird, dass das Assimilationsergebnis der in situ gemessenen Elektronendichteverteilung deutlich näher kommt als die ursprüngliche Modellannahme. Weiterhin zeigt Abb. 7.5 exemplarisch die Variabilität der Elektronendichte entlang der CHAMP-Flugbahn während eines vollständigen Umlaufs. Der dargestellte CHAMP-Orbit durchquert den miternächtlichen bzw. den mittäglichen Lokalzeitsektor. Die zu erwartenden Unterschiede zwischen Tages- und Nacht-Ionisation sind deutlich sichtbar. Dies gilt insbesondere für die äquatorialen Bereiche, die anhand der jeweiligen Ionisationsmaxima gut zu erkennen sind. Die äquatoriale Anomalie (siehe Kapitel 2.3.1) ist im Tagessektor erwartungsgemäß deutlich ausgeprägt, während sie auf der Nachtseite nicht zu identifizieren ist. Offensichtlich sind auch die Ionisationsunterschiede zwischen den Bereichen des Polartages und der Polarnacht.

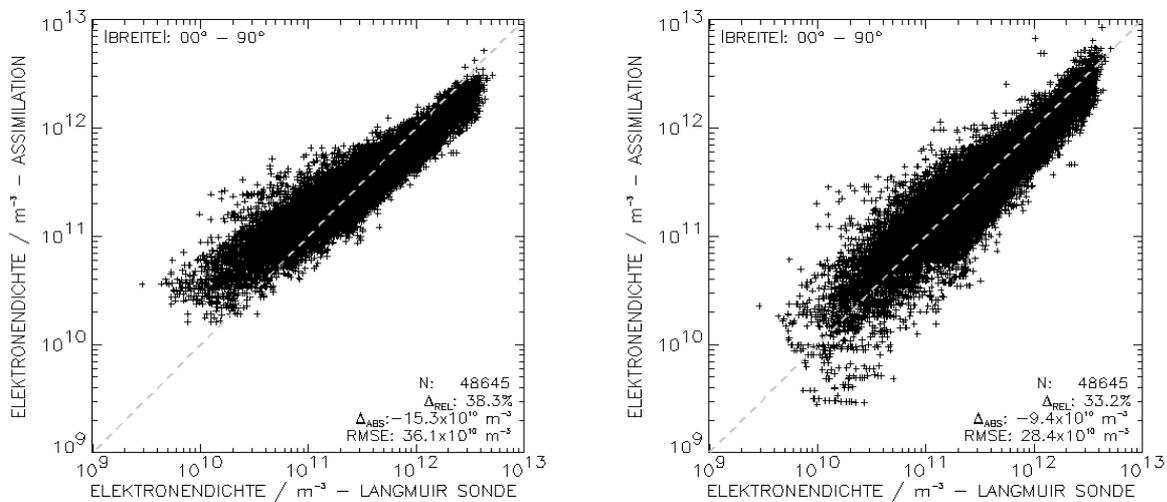


Abb. 7.6: Streudiagramme zwischen Messungen der Langmuir-Sonde und korrespondierenden Assimilationsergebnissen für alle Messungen des Zeitraum vom 22. bis zum 28. April 2001. **links:** ohne gegenseitige Beeinflussung der modifizierten Voxel. **rechts:** mit entsprechender Beeinflussung.

Natürlich ist es nicht möglich, das gesamte Assimilationsergebnis mit Hilfe der Messungen der Langmuir-Sonde zu validieren. Allerdings würden systematische Abweichungen zwischen den durch Assimilation abgeleiteten Elektronendichtewerten entlang der CHAMP-Flugbahn und den korrespondierenden in-situ-Messungen insbesondere dann einen deutlichen Hinweis auf Unzulänglichkeiten des verwendeten Assimilationsverfahrens geben, wenn diese Abweichungen nicht durch die initiale Modellannahme bedingt sind. Solche Abweichungen würden auch den Rückschluss auf systematische Fehler in der rekonstruierten Elektronendichteverteilung oberhalb der CHAMP-Orbithöhe zulassen. Andererseits ist eine gute Übereinstimmung zwischen Assimilation und Langmuir-Sonde bzw. eine deutliche Verbesserung der initialen Modellannahme durch die Assimilation als ein sicherer Hinweis für die prinzipielle Eignung des verwendeten Assimilationsverfahrens zu werten. Vor diesem Hintergrund bieten die Elektronendichtemessungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP eine gute und zudem die einzig umfassende Validierungsmöglichkeit für das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Assimilationsverfahren.

In den Kapiteln 6.2.2 und 6.2.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Validierungsergebnisse mit den Messungen der Langmuir-Sonde eine wertvolle Hilfe bei der Entwicklung des vorgestellten Assimilationsverfahrens bieten konnten. Insbesondere die in

Kapitel 6.2.2 beschriebene gegenseitige Beeinflussung der modifizierten Voxel nach jedem Iterationsschritt wurde unter Berücksichtigung solcher Validierungsergebnisse eingeführt. Abb. 7.6 zeigt anhand zweier Streudiagramme zwischen Messungen der Langmuir-Sonde und korrespondierenden Assimilationsergebnissen eine deutliche Verminderung der systematischen Abweichung der Assimilationsergebnisse von den in-situ-Messungen nach Einführung der gegenseitige Beeinflussung der modifizierten Voxel. In Anlehnung an die Messrate der CHAMP-GPS-Daten werden dabei Elektronendichtewerte im zeitlichen Abstand von 10 Sekunden entlang der CHAMP-Flugbahn verglichen. In Abb. 7.6 bezeichnet N die Anzahl der betrachteten Messungen, während sich die drei angegebenen Abweichungsgrößen Δ_{REL} , Δ_{ABS} und RMSE wie folgt ergeben:

$$\Delta_{\text{REL}} = \frac{\sum_{i=1}^N |(Ne_i^A - Ne_i^L)/Ne_i^L|}{N} \times 100\% \quad (7.1)$$

$$\Delta_{\text{ABS}} = \frac{\sum_{i=1}^N (Ne_i^A - Ne_i^L)}{N} \quad (7.2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ne_i^A - Ne_i^L)^2}{N}} \quad (7.3)$$

Dabei bezeichnet Ne_i^A den i -ten per Assimilation bestimmten Elektronendichtewert entlang der CHAMP-Flugbahn, während Ne_i^L die jeweils korrespondierende Messung der Langmuir-Sonde symbolisiert. Wie Gleichung (7.1) zeigt, gibt Δ_{REL} den Mittelwert der Absolutbeträge der relativen Abweichungen der Assimilationsergebnisse von den in-situ-Messungen an. Δ_{ABS} stellt eine Größe zur Einschätzung der mittleren absoluten Abweichung zwischen Assimilation und Langmuir-Sonde dar, während der RMSE ein Maß für die Streuung zwischen den per Assimilation bestimmten Elektronendichtewerten und den in-situ-Messungen angibt.

Da die Ionisation im Bereich der CHAMP-Flughöhe einem ausgeprägten Tagesgang unterliegt, sollte eine aussagekräftige Validierung der Assimilationsergebnisse mit den Messungen der Langmuir-Sonde alle Lokalzeitbereiche erfassen und diese in Erwartung lokalzeitlicher Unterschiede auch separat betrachten. Weiterhin existieren signifikante Unterschiede zwischen der Ionosphäre der niederen, mittleren und hohen Breiten (siehe Kapitel 2.3.1). Daher soll bei der Validierung auch nach diesen Regionen unterschieden werden.

Die lokalzeitliche Lage der CHAMP-Orbitebene verändert sich nur relativ langsam. Wie in Kapitel 5.4.2 bei der Diskussion von Abb. 5.9 deutlich wurde, dauert es etwa 130 Tage, bis die CHAMP-Orbitebene alle Lokalzeitsektoren einmal durchstreift hat. Daher werden zur vorgesehenen Validierung Assimilationsergebnisse und Messungen der Langmuir-Sonde eines entsprechenden Zeitintervalls benötigt. Im Zusammenhang mit dem begrenzten Vorliegen der Daten der Langmuir-Sonde wurde der Zeitraum vom 30. August bis zum 31. Dezember 2001 als Validierungsintervall gewählt.

Abb. 7.7 zeigt zunächst Streudiagramme zwischen Langmuir-Sonde und initialem Modell bzw. Assimilation über alle Lokalzeiten und Breitenbereiche für den genannten Validierungszeitraum. Dabei werden mehr als eine Million Einzelmessungen betrachtet, die gemäß des Zeitregimes der CHAMP-GPS-Messungen einen zeitlichen Abstand von jeweils 10 Sekunden aufweisen. Der Vergleich der beiden Streudiagramme in Abb. 7.7 zeigt deutlich die Verbesserung der initialen Modellannahme durch den Assimilationsprozess in Richtung der tatsächlichen (in situ gemessenen) Elektronendichtewerte entlang

der CHAMP-Flugbahn. Dies dokumentiert auch eine Gegenüberstellung der Abweichungsgrößen Δ_{REL} , Δ_{ABS} und RMSE. Während das initiale Modell im Vergleich zur Langmuir-Sonde eine mittlere relative Abweichung von 125,9 % bei einem RMSE von $51,9 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ aufweist und diese im Mittel um $15,8 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ unterschätzt, zeigt der Vergleich zwischen Assimilation und Langmuir-Sonde eine mittlere relative Abweichung von nur noch 78,2% wobei sich der RMSE auf $36,5 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ reduziert und die Langmuir-Sonde im Mittel nur noch um $3,2 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ von der Assimilation unterschätzt wird.

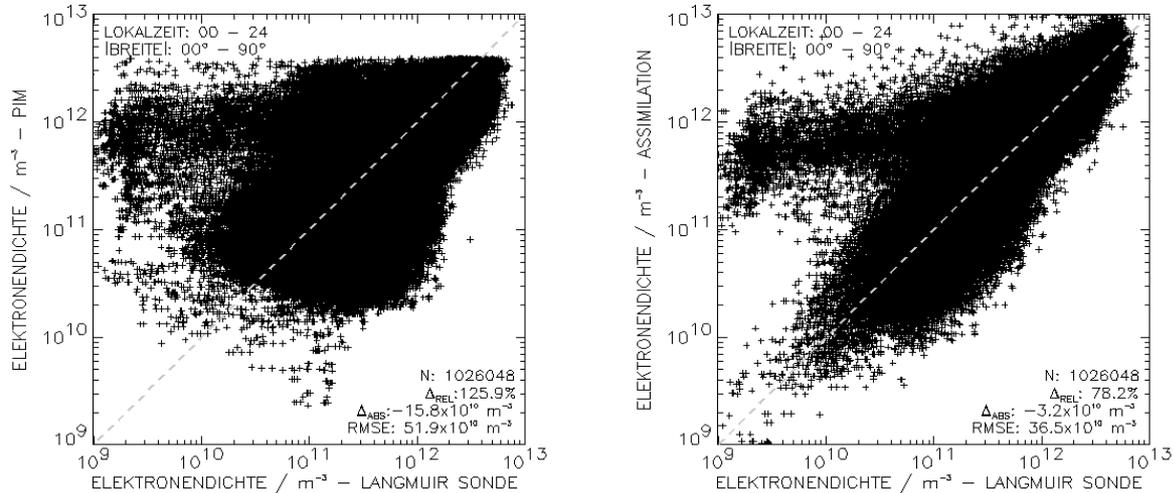


Abb. 7.7: links: Streudiagramm zwischen Messungen der Langmuir-Sonde und korrespondierenden initialen Modellwerten (PIM) für den Zeitraum vom 30. August bis zum 31. Dezember 2001 (alle Lokalzeitbereiche). rechts: Streudiagramm zwischen Langmuir-Sonde und Assimilationsergebnissen für den selben Zeitraum.

Weiterhin gibt Abb. 7.7 deutliche Anhaltspunkte dafür, dass die von PIM ausgegebenen maximalen Elektronendichtewerte einer modellinternen Begrenzung unterliegen, da ein Elektronendichtewert von etwa $4 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ praktisch nicht überschritten wird. Diese modellinterne Obergrenze wird durch den Assimilationsprozess klar aufgehoben. Auch der augenscheinliche Mangel an sehr kleinen Elektronendichtewerten seitens PIM kann durch die Assimilation deutlich korrigiert werden. Im Allgemeinen wird die initiale Modellannahme entlang der CHAMP-Orbitebene durch die Assimilation also signifikant verbessert. Allerdings weichen auch die Assimilationsergebnisse unter Umständen erheblich von den in-situ-Messungen ab. Eine in allen Fällen gute Übereinstimmung kann aber vor dem Hintergrund dessen, dass die Assimilationsergebnisse auf einer vom Eingangsmodell und der Beobachtungsdatenlage abhängigen Lösung eines unterbestimmten Gleichungssystems basieren, kaum erwartet werden.

Besonders auffällig ist bei der Betrachtung von Abb. 7.7 allerdings eine gehäufte und drastische Überschätzung sehr geringer in situ gemessener Elektronendichtewerte der Größenordnung 10^9 m^{-3} bis 10^{10} m^{-3} sowohl durch die initialen Modellwerte als auch durch die Assimilationsergebnisse. Offensichtlich können hier grobe Abweichung des Ausgangsmodells vom tatsächlichen Ionisationszustand durch die Assimilation gar nicht bzw. nur sehr geringfügig korrigiert werden. Es wurde bereits angesprochen, dass es aufgrund signifikanter Unterschiede zwischen der Ionosphäre der niederen, mittleren und hohen Breiten sinnvoll erscheint, diese Regionen bei der Validierung separat zu betrachten. Eine solche getrennte Betrachtung gibt weiterhin Aufschluss darüber, ob die angesprochene Abweichung zwischen Langmuir-Sonde und Assimilation bzw. Ausgangsmodell einer bestimmten Region zuzuordnen ist oder keine regionale Abhängigkeit aufweist.

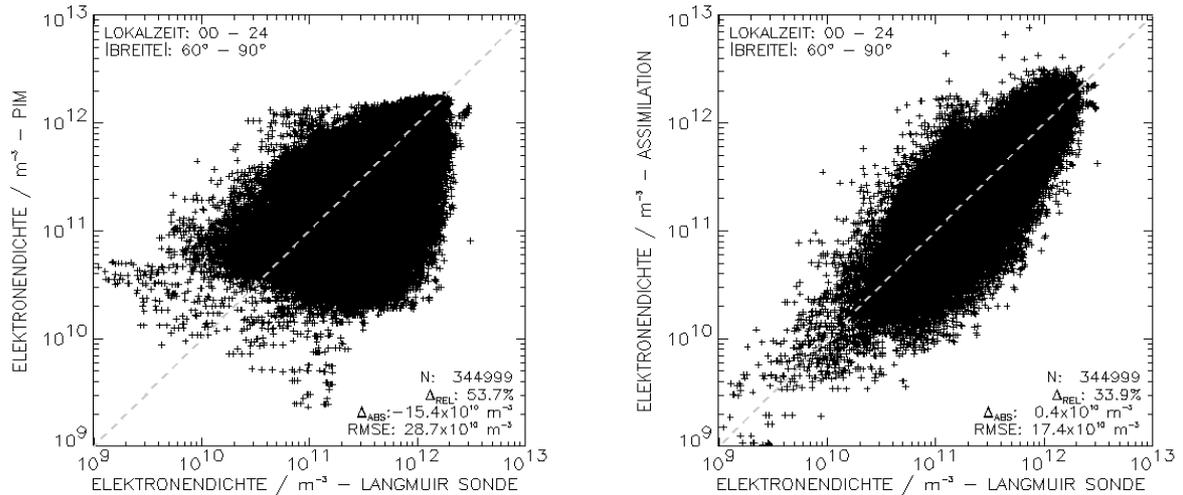


Abb. 7.8: Streudiagramme hohe Breiten ($60^\circ \leq |\varphi| \leq 90^\circ$), korrespondierend zu Abb. 7.7.

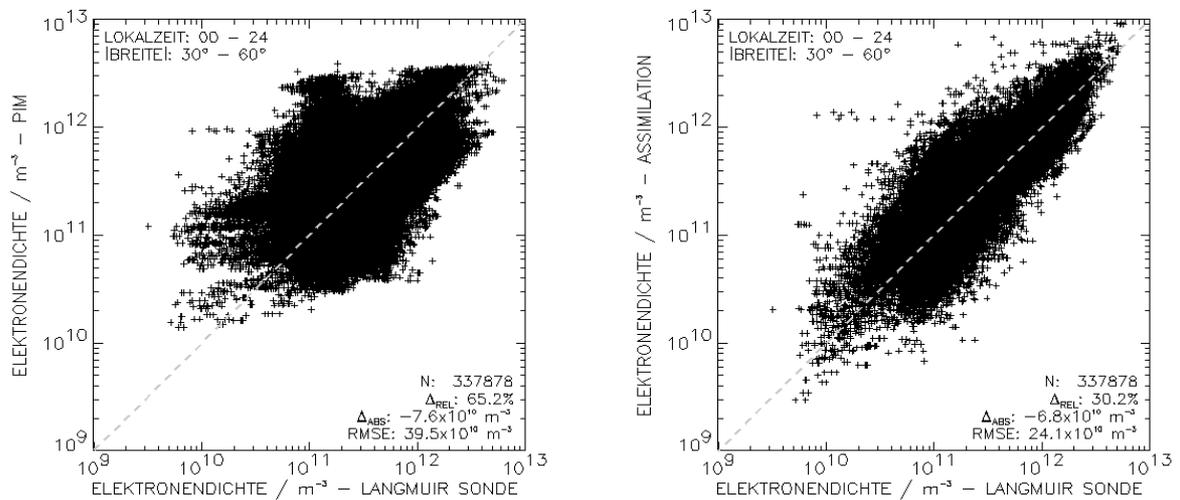


Abb. 7.9: Streudiagramme mittlere Breiten ($30^\circ < |\varphi| < 60^\circ$), korrespondierend zu Abb. 7.7.

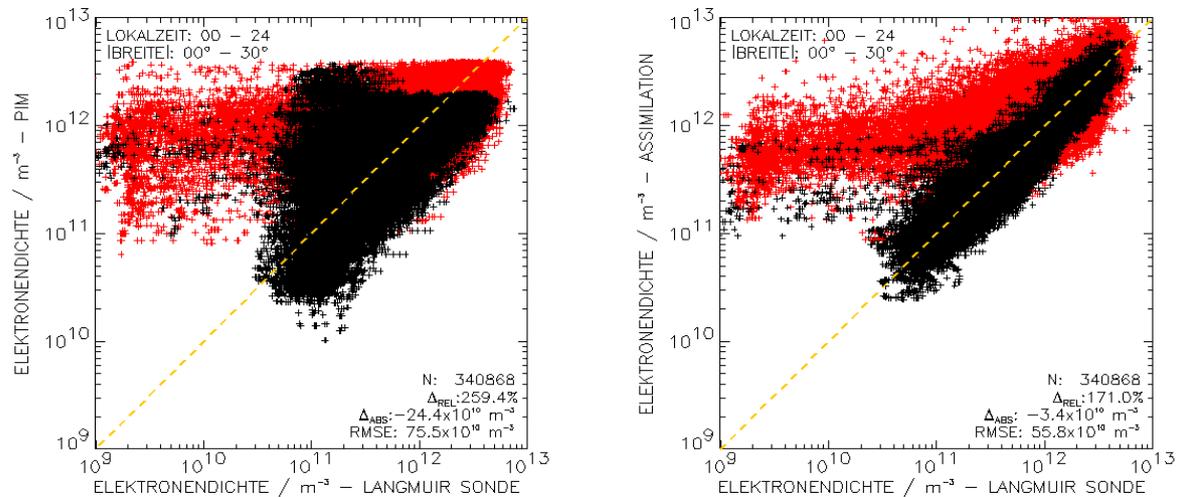


Abb. 7.10: Streudiagramme niedere Breiten ($0^\circ \leq |\varphi| \leq 30^\circ$), korrespondierend zu Abb. 7.7.; Messungen aus dem Lokalzeitbereich zwischen 18 und 24 Uhr sind rot eingefärbt.

Abb. 7.8 bis Abb. 7.10 zeigen die zu Abb. 7.7 korrespondierenden Streudiagramme, welche jeweils den Vergleich zwischen Langmuir-Sonde und initialem Modell bzw. Assimilation separat für hohe, mittlere und nieder Breiten darstellen. Wie nach Betrachtung von Abb. 7.7 nicht anders zu erwarten, zeigen Abb. 7.8 bis Abb. 7.10 jeweils deutliche Verbesserungen der initialen Modellannahme durch den Assimilationsprozess, wobei die angegebenen Abweichungsgrößen Δ_{REL} , Δ_{ABS} und RMSE zwischen Langmuir-Sonde und initialem Modell durch die Assimilation in allen betrachteten Breitenbereichen signifikant reduziert werden. Weiterhin wird deutlich, dass die angesprochene gehäufte Überschätzung geringer in situ gemessener Elektronendichtewerte der Größenordnung 10^9 m^{-3} bis 10^{10} m^{-3} nur in den niederen Breiten auftritt. Wie Abb. 7.10 anhand der rot eingefärbten Messungen aus dem Lokalzeitbereich zwischen 18 und 24 Uhr deutlich zeigt, treten diese drastischen Abweichungen zwischen Langmuir-Sonde und Assimilation bzw. Modell praktisch nur in den Abendstunden in niederen Breiten auf.

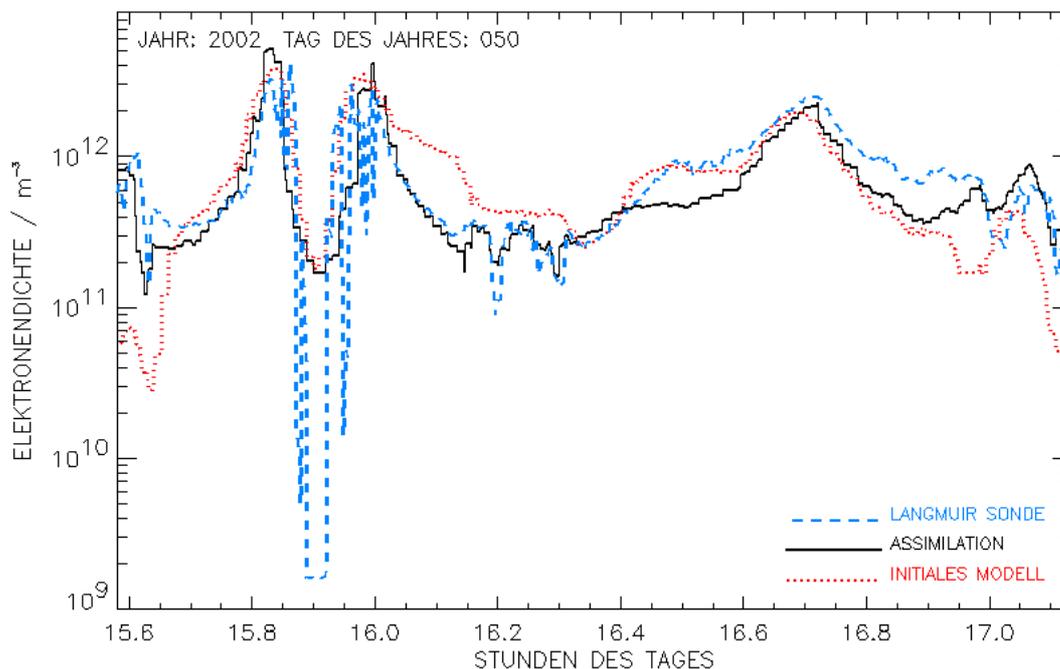


Abb. 7.11: Elektronendichtevergleich zwischen Langmuir-Sonde, Assimilation und initialer Modellannahme entlang der CHAMP-Flugbahn für einen konkreten Umlauf am 19. Februar 2002 im 21- bzw. 9-Uhr-Lokalzeitsektor.

Es liegt nahe, die großen Differenzen zwischen den in-situ-Messungen und den Assimilationsergebnissen bzw. den Ausgangsmodellwerten in Verbindung mit der äquatorialen Anomalie (siehe Kapitel 2.3.1) zu bringen, welche bei hoher solarer Aktivität, wie sie im Validierungszeitraum vorlag, in den Abendstunden besonders stark ausgeprägt ist. In diesem Zusammenhang treten auch häufig Plasmainstabilitäten in Verbindung mit extrem geringen lokalen Elektronendichten in einem Höhenbereich auf, in dem üblicherweise die F-Schicht mit dem Maximum der ionosphärischen Elektronendichte anzutreffen ist (z.B. Basu und Basu, 1981). Aufgrund der mit etwa 400 km relativ geringen Flughöhe von CHAMP ist zu erwarten, dass der Satellit im abendlichen Lokalzeitsektor relativ häufig diesen Bereich sehr geringer Elektronendichten durchquert und die Langmuir-Sonde entsprechende Messwerte liefert. Abb. 7.11 veranschaulicht diesen Sachverhalt anhand eines Elektronendichtevergleichs zwischen Langmuir-Sonde, Assimilation und initialer Modellannahme für einen speziellen CHAMP-Orbit, dessen Ebene im 21- bzw. 9-Uhr-Lokalzeitsektor liegt. Die gewaltigen Schwankungen der in situ gemessenen Elektronendichte um mehr als 3 Größenordnungen im ersten Drittel des gezeigten Orbits sind dabei dem abendlichen äquatorialen Bereich zuzuordnen. Wie Abb. 7.11 zeigt, überschätzt das

initiale Modell die extremen Minima der Elektronendichte bei weitem und auch der Assimilationsprozess ist nicht in der Lage, diese Abweichungen zu korrigieren. Da die in Abb. 7.11 für einen einzelnen Orbit gezeigten erheblichen Differenzen zwischen in-situ-Messungen und Assimilationsergebnissen bzw. initialen Modellwerten kein Einzelfall, sondern bei entsprechender Lage der CHAMP-Orbitebene im abendlichen äquatorialen Bereich eher die Regel sind, liegt hier eindeutig die Ursache der angesprochenen gehäuften Abweichungen in Abb. 7.7 bzw. Abb. 7.10.

Nun stellt sich die Frage, warum es offenkundig nicht gelingt, die starken Abweichungen zwischen in-situ-Messungen und initialen Modellwerten im abendlichen äquatorialen Bereich durch die Assimilation nennenswert zu reduzieren. Für diesen Sachverhalt kommen verschiedene Ursachen in Betracht: Zum einen stellen die Assimilationsergebnisse die Lösung eines unterbestimmten Gleichungssystems dar, welche a priori vom initialen Modell abhängt. Starke Abweichungen des Anfangsmodells vom tatsächlichen Ionisationszustand, wie sie in den abendlichen äquatorialen Regionen offenbar vorliegen, können daher prinzipiell zu fehlerhaften Assimilationsergebnissen führen. Weiterhin ist die horizontale Auflösung der zur Assimilation verwendeten globalen Voxel-Struktur (siehe Kapitel 6.1.1) unter Umständen zu grob, um relativ kleinräumige horizontale Strukturen der Elektronendichteverteilung auflösen zu können, da bei der Ableitung der Elektronendichte innerhalb eines Voxels über die Informationen aller TEC-Messungen gemittelt wird, welche dieses Voxel durchqueren. Schließlich ist zu berücksichtigen, dass die Assimilationsergebnisse auf der Auswertung integraler TEC-Messungen beruhen, während die Langmuir-Sonde eine Punktmessung vornimmt. Treten nun starke Elektronendichtegradienten auf, wie dies in den abendlichen äquatorialen Bereichen der Fall ist, so sind die Messungen der Langmuir-Sonde problemlos in der Lage, diesen Gradienten zu folgen. Die integralen TEC-Messungen hängen dagegen von der Elektronendichteverteilung entlang des gesamten Strahlenweges ab und reagieren daher naturgemäß weit weniger sensibel auf vergleichsweise kleinräumige, wenn auch sehr starke Schwankungen der Elektronendichte. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Elektronendichteverteilung der abendlichen äquatorialen Ionosphäre in CHAMP-Flughöhe neben den in Abb. 7.11 deutlich sichtbaren horizontalen Gradienten auch sehr starke vertikale Gradienten aufweist. Diese sind durch den sogenannten Fontänen-Effekt (siehe Kapitel 2.3.1) bedingt, in dessen Folge die freien Ladungsträger aus dem Bereich der F-Schicht in größere Höhen befördert werden. Durch das Fehlen der ionisierenden Strahlung nach Sonnenuntergang kommt es dazu, dass der Bereich der F-Schicht bezüglich der freien Ladungsträger quasi ausgepumpt wird, so dass die in Abb. 7.11 sichtbaren sehr geringen Elektronendichten entstehen. Die durch den Fontänen-Effekt in größere Höhen transportierten freien Ladungsträger führen dort jedoch zu deutlich höheren Elektronendichten als sie im eigentlichen Bereich der F-Schicht vorliegen, so dass sich ein starker vertikaler Gradient herausbildet. Daher ist nicht zu erwarten, dass eine TEC-Messung, deren Strahl vertikal zwischen CHAMP und einem GPS-Satelliten verläuft, sensibel auf die sehr geringen Elektronendichten im Bereich des CHAMP-Satelliten reagiert. Durch die erhöhte Elektronendichte in größerer Höhe könnte der geringe TEC-Beitrag aus dem Bereich der CHAMP-Flughöhe sogar vollständig überlagert werden. Da die strahlenwegbezogenen TEC-Messungen der GPS-Zenitantenne auf CHAMP naturgemäß eher vertikal als horizontal verlaufen, erscheint es also nicht verwunderlich, dass die Assimilation dieser TEC-Messungen das initiale Modell im abendlichen äquatorialen Bereich nicht wesentlich verbessern kann.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die erheblichen Abweichungen zwischen Assimilationsergebnissen und in-situ-Messungen im abendlichen äquatorialen Bereich nicht in erster Linie auf einen prinzipiellen Mangel des verwendeten Assimilationsverfahrens hindeuten, sondern vielmehr die Grenzen des Informationsgehaltes der zur Assimilation

vorliegenden TEC-Messungen und der horizontalen Auflösung der verwendeten Voxel-Struktur aufzeigen.

Abschließend soll die Validierung der Assimilationsergebnisse mit den Messungen der Langmuir-Sonde separat für die verschiedenen Lokalzeitsektoren und geographische Regionen betrachtet werden. Zu diesem Zweck zeigen Abb. 7.12 bis Abb. 7.14 die lokalzeitliche und regionale Abhängigkeit der Abweichungsgrößen Δ_{REL} , Δ_{ABS} und RMSE (siehe Gleichungen (7.1) bis (7.3)). Die regionale Unterscheidung erfolgt analog zu Abb. 7.8 bis Abb. 7.10 nach hohen ($60^\circ \leq |\varphi| \leq 90^\circ$), mittleren ($30^\circ < |\varphi| < 60^\circ$) und niederen ($0^\circ \leq |\varphi| \leq 30^\circ$) Breiten, welche in dieser Reihenfolge in Abb. 7.12 bis Abb. 7.14 von oben nach unten dargestellt sind. Die betrachteten Lokalzeitsektoren umfassen jeweils drei Stunden, wobei die pro Lokalzeitsektor und Region verbleibende Anzahl der zum Vergleich verfügbaren Einzelmessungen zwischen 30000 und 45000 liegt.

Bei der Betrachtung von Abb. 7.12 bis Abb. 7.14 wird deutlich, dass die verschiedenen Abweichungsgrößen neben den bereits gezeigten regionalen auch lokalzeitliche Abhängigkeiten innerhalb der verschiedenen Regionen aufweisen. Besonders eindrucksvoll sind in diesem Zusammenhang die bereits diskutierten deutlichen Abweichungen zwischen Assimilation bzw. PIM und Langmuir-Sonde im abendlichen äquatorialen Bereich, welche im Lokalzeitsektor von 18 bis 21 Uhr ein ausgeprägtes Maximum aufweisen (Abb. 7.12 und Abb. 7.14). Weiterhin ist klar erkennbar, dass die Abweichungen des initialen Modells von der Langmuir-Sonde mit Ausnahme des abendlichen Lokalzeitsektors (18 bis 21 Uhr) in niederen Breiten durch die Assimilation generell signifikant vermindert werden, wobei im Allgemeinen auch eine Verminderung des Tagesgangs der Abweichungen zwischen PIM und Langmuir-Sonde durch die Assimilation zu beobachten ist.

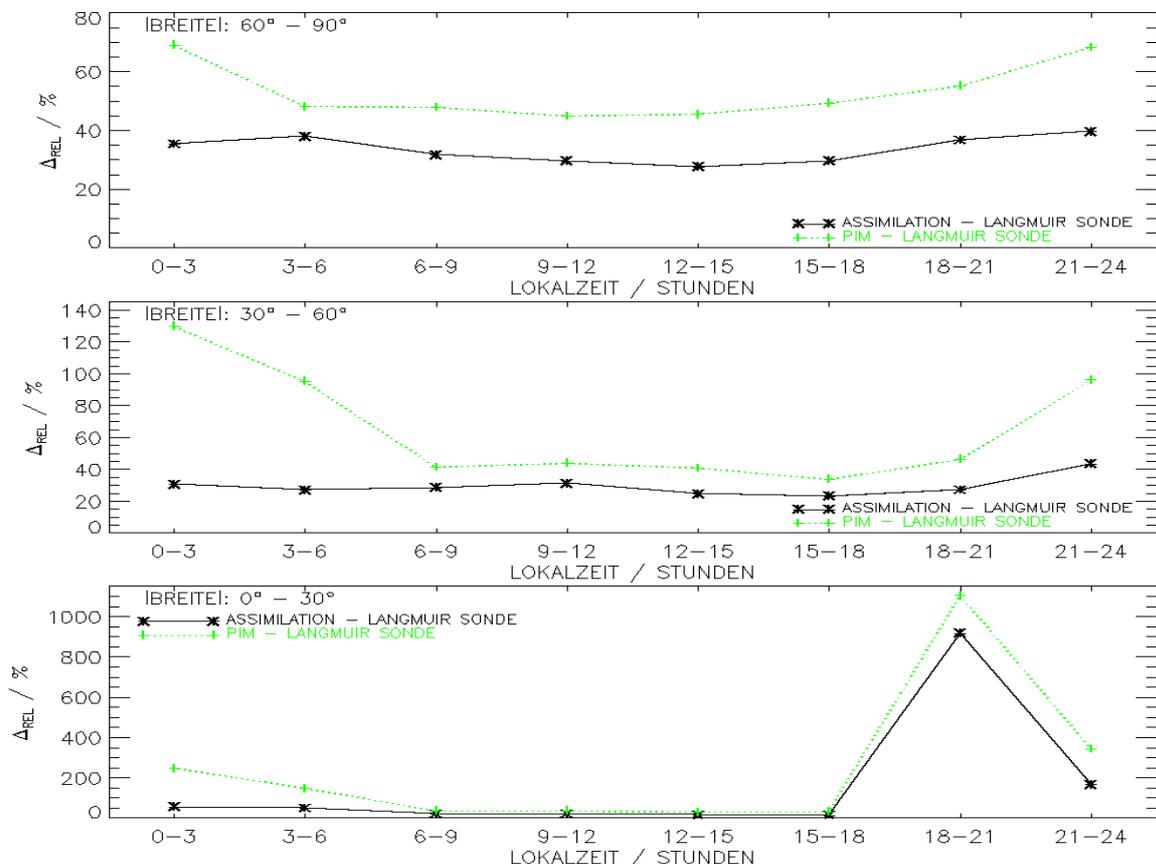


Abb. 7.12: Lokalzeitliche und regionale Abhängigkeit der relativen Abweichungen zwischen Assimilation bzw. initialem Modell (PIM) und Langmuir-Sonde.

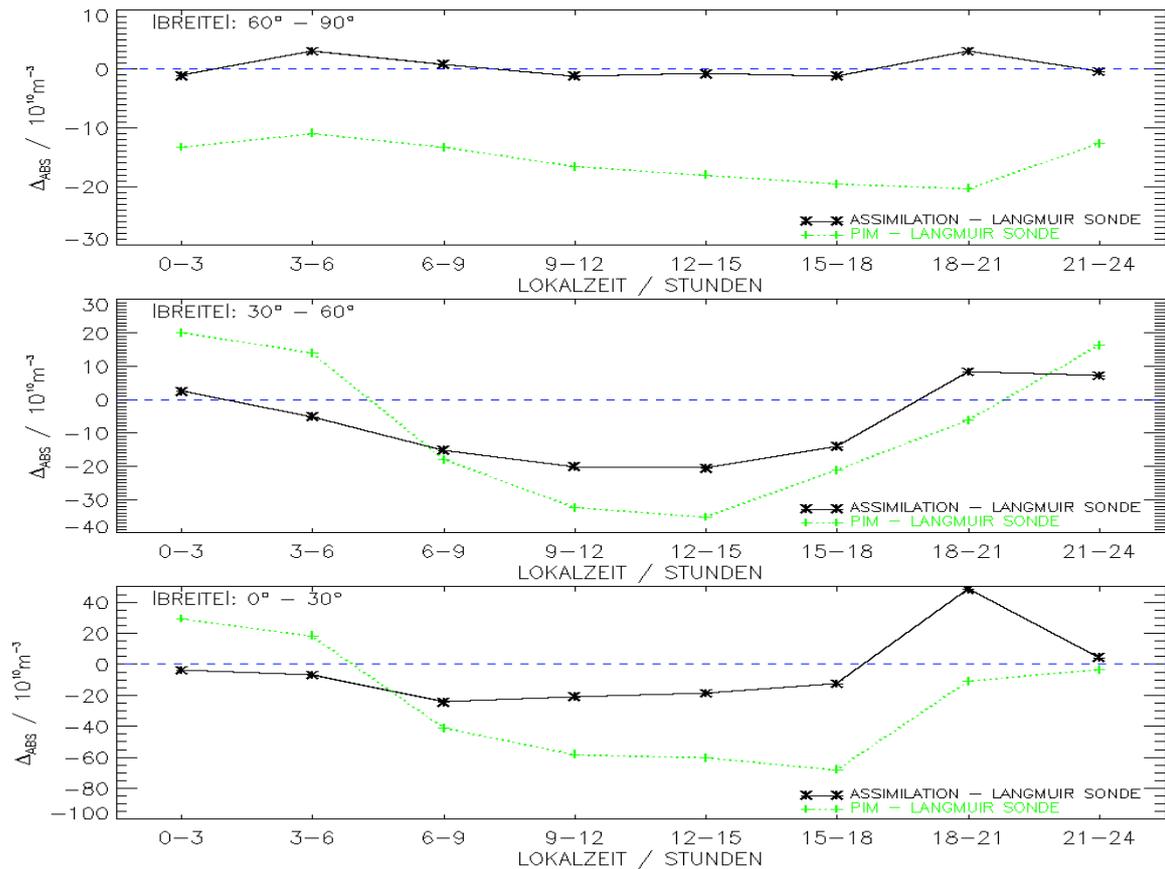


Abb. 7.13: Lokalzeitliche und regionale Abhängigkeit der absoluten Abweichungen zwischen Assimilation bzw. initialem Modell (PIM) und Langmuir-Sonde.

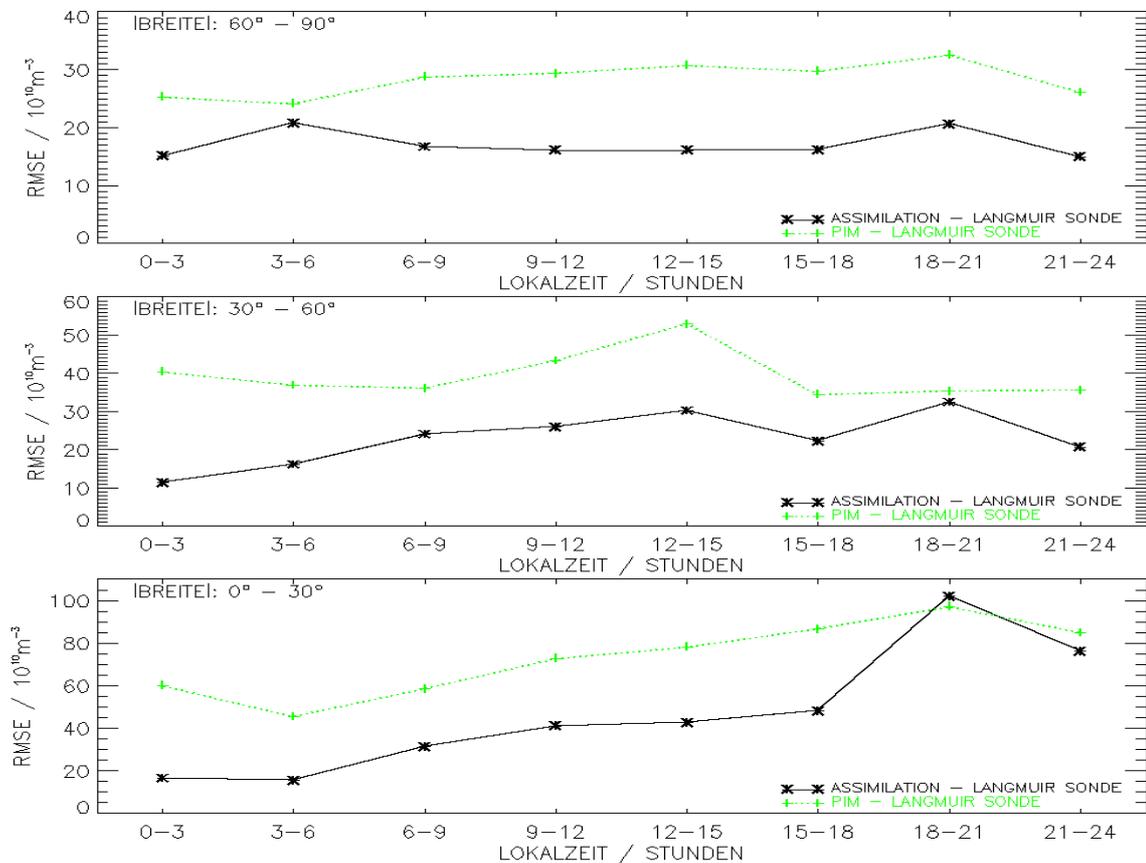


Abb. 7.14: Lokalzeitliche und regionale Abhängigkeit des RMSE zwischen Assimilation bzw. initialem Modell (PIM) und Langmuir-Sonde.

7.2.2 Incoherent-Scatter-Radar-Messungen

Das Incoherent-Scatter-Radar (siehe Kapitel 2.7.2) stellt das derzeit zuverlässigste Verfahren zur bodengebundenen Fernerkundung der Topside-Ionosphäre dar, wobei es Messungen bis in eine Höhe von etwa 1000 km ermöglicht. Gleichzeitig bietet es die einzigen im Rahmen dieser Arbeit verfügbaren Elektronendichtemessungen zur Validierung der per Assimilation abgeleiteten Elektronendichten oberhalb der CHAMP-Flugbahn. Sollen diese Messungen zu Validierungszwecken verwendet werden, so besteht zwangsläufig die Notwendigkeit der zeitlichen und räumlichen Koinzidenz zu den Assimilationsergebnissen, d.h., die Messungen des Incoherent-Scatter-Radar sollten in möglichst geringem Abstand zur jeweiligen CHAMP-Orbitebene liegen und müssen innerhalb des jeweiligen Orbitzeitraumes gemessen worden sein. Wie bereits in Kapitel 2.7.2 erwähnt, ist der Betrieb des Incoherent-Scatter-Radar recht aufwendig und kostenintensiv, so dass es weltweit nur an wenigen Standorten zu bestimmten Kampagnen betrieben wird, wobei die Messdaten im Allgemeinen erst mit einiger Verzögerung frei verfügbar sind. Zusammen mit den notwendigen Koinzidenzbedingungen reduzieren diese Tatsachen die Validierungsmöglichkeiten mit Messungen des Incoherent-Scatter-Radar im Rahmen dieser Arbeit praktisch auf Einzelfallbetrachtungen, die noch keine statistischen Aussagen erlauben. Dennoch vermitteln solche Einzelfallstudien einen wertvollen wenn auch beschränkten Eindruck zur Qualität der per Assimilation rekonstruierten Elektronendichteverteilung im Bereich der oberen Ionosphäre oberhalb der CHAMP-Flugbahn. Bei Vorliegen umfassenderer Datensätze wird es zukünftigen Untersuchungen vorbehalten bleiben, die Assimilationsergebnisse im Bereich der oberen Ionosphäre weiterführend zu validieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Messungen der Incoherent-Scatter-Radars in Millstone Hill (42,6°N, 288,5°E) und Longyearbyen (Svalbard Radar, 78,1°N, 16,0°E) zu Validierungszwecken verwendet, die via Internet [<http://www.haystack.mit.edu/madrigan>] frei verfügbar sind.

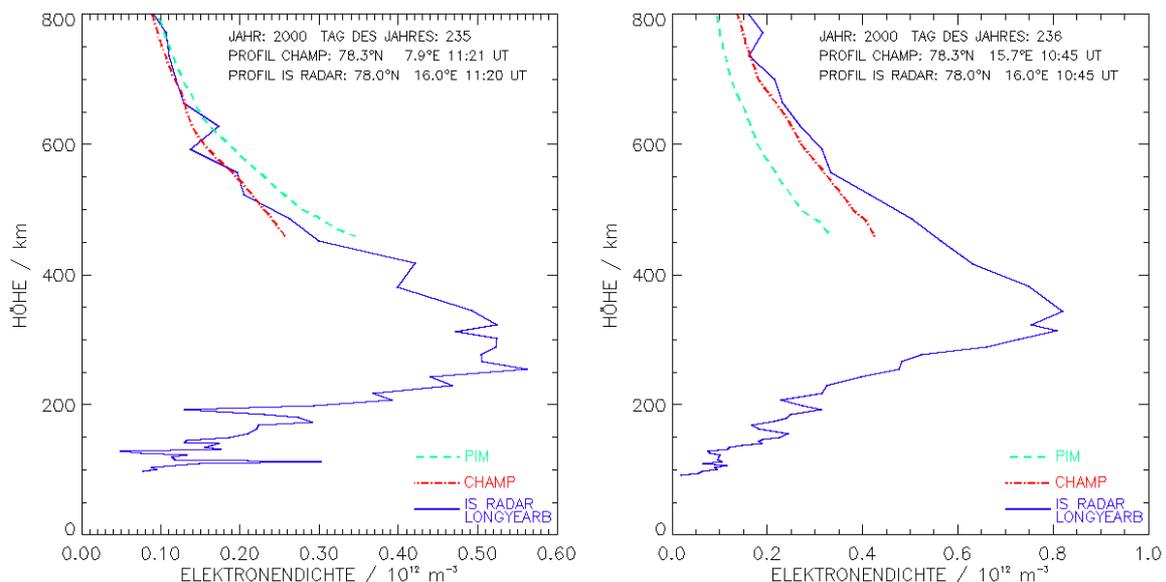


Abb. 7.15: Elektronendichteprofile von Incoherent-Scatter-Radar, Assimilation (CHAMP) und initialem Modell (PIM) für bestimmte Koinzidenzen zwischen CHAMP und Longyearbyen. **links:** 22. August 2000, 11:20 UTC. **rechts:** 23. August 2000, 10:45 UTC.

Abb. 7.15 und Abb. 7.16 zeigen exemplarisch Elektronendichteprofile von Incoherent-Scatter-Radar, Assimilation und initialem Modell für Koinzidenzen zwischen CHAMP und Longyearbyen bzw. Millstone Hill und vermitteln einen repräsentativen Eindruck der in

Form von Einzelfallstudien durchgeführten Validierung der Assimilationsergebnisse mit Messungen der genannten Incoherent-Scatter-Radars. Die Betrachtung der gezeigten Koinzidenzen bestätigt die Validierungsergebnisse mit den Messungen der Langmuir-Sonde qualitativ auch für den Bereich der oberen Ionosphäre oberhalb der CHAMP-Flugbahn: Die Assimilation führt im Allgemeinen zu einer signifikanten Verbesserung der initialen Modellannahme, wobei im Einzelfall jedoch nicht von einer perfekten Übereinstimmung zwischen Assimilationsergebnis und tatsächlichem Ionisationszustand auszugehen ist.

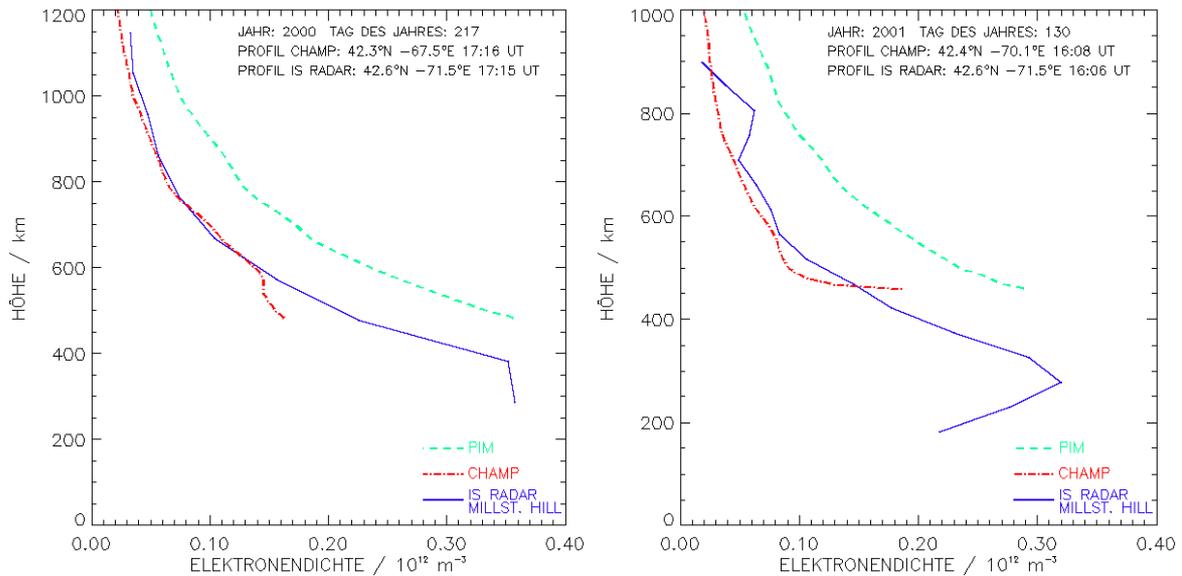


Abb. 7.16: Elektronendichteprofile von Incoherent-Scatter-Radar, Assimilation (CHAMP) und initialem Modell (PIM) für bestimmte Koinzidenzen zwischen CHAMP und Millstone Hill. **links:** 04. August 2000, 17:15 UTC. **rechts:** 10. Mai 2001, 16:06 UTC.

7.2.3 Ionosondenmessungen

Prinzipiell sind Ionosonden (siehe Kapitel 2.7.2) zwar nicht in der Lage, die Topside-Ionosphäre und damit den zur Validierung der Assimilationsergebnisse interessierenden Bereich zu sondieren. Es existiert jedoch eine Methode von *Huang und Reinisch* (2001), welche es erlaubt, das jeweilige Topside-Profil auf Grundlage der Bottomside-Messungen von Ionosonden zu extrapolieren. Die mit der zugehörigen Software ausgestatteten Ionosonden werden auch als Digisonden bezeichnet. Solche Digisonden werden im Gegensatz zu den Incoherent-Scatter-Radars permanent betrieben, und bieten daher bei derselben Notwendigkeit zeitlicher und räumlicher Koinzidenz in vergleichbaren Zeiträumen prinzipiell umfangreichere Validierungsdatensätze als die Incoherent-Scatter-Radars. Da die interessierenden Daten aus dem Bereich der Topside-Ionosphäre allerdings nicht auf wirklichen Messungen, sondern nur auf einer Schätzung beruhen, deren Qualität im Einzelfall noch nicht vollständig geklärt ist, wurden die Messungen von Digisonden im Rahmen dieser Arbeit nur zu stichprobenartigen Vergleichen herangezogen. Dabei wurden Messungen der Ionosondenstationen Juliusruh (54,4°N, 13,4°E) und Athen (38,0°N, und 23,6°E) verwendet.

Die durchgeführten Vergleiche von Assimilationsergebnissen bzw. initialen Modellannahmen mit entsprechenden Digisondenprofilen untermauern generell die in Kapitel 7.2.2 ausgeführten Validierungsergebnisse mit den Messungen der Incoherent-Scatter-Radars. Abb. 7.17 zeigt in diesem Zusammenhang exemplarisch Profile der Digisonden Juliusruh

und Athen im Vergleich zu korrespondierenden Assimilationsergebnissen (CHAMP), den entsprechenden initialen Modellannahmen (PIM) und in diesen Fällen verfügbaren Messungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP. In beiden Fällen ist sichtbar, dass die per Assimilation abgeleitete vertikale Elektronendichteverteilung dem Digisondenprofil und der Messung der Langmuir-Sonde deutlich näher kommt als die initiale Modellannahme. Auffällig sind allerdings die Differenzen zwischen CHAMP- und Digisondenprofilen ab einer Höhe von etwa 500 km. In beiden Fällen unterschätzt die Digisonde die rekonstruierte Elektronendichte der Topside-Ionosphäre. Bemerkenswert ist, dass vergleichbare Differenzen im Höhenbereich zwischen etwa 500 und 1000 km bei der Validierung mit den Incoherent-Scatter-Radars nicht zu beobachten waren.

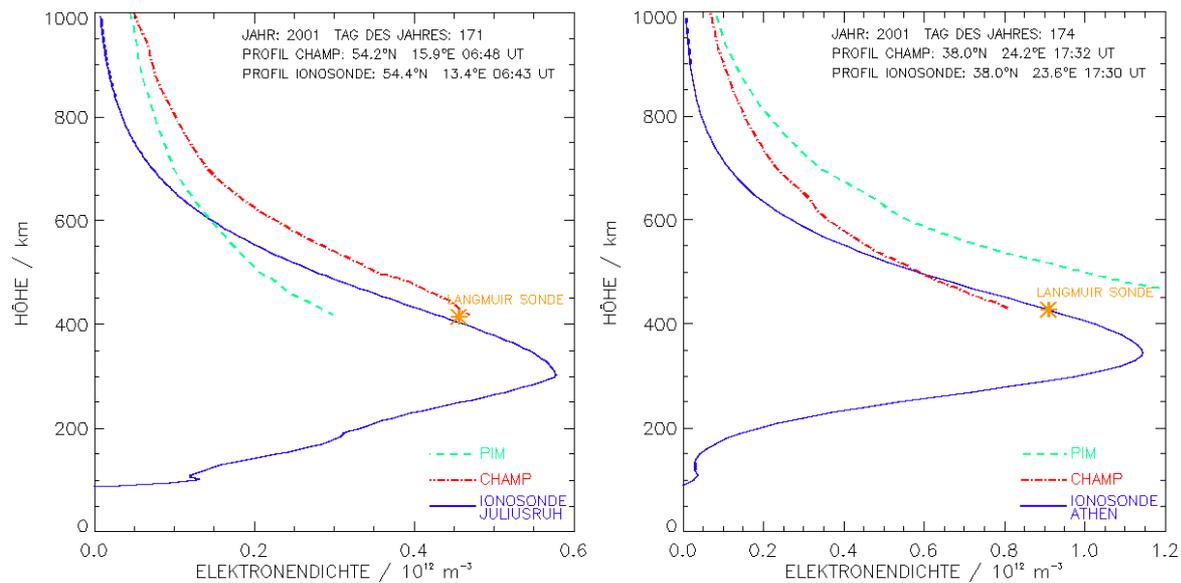


Abb. 7.17: Elektronendichteprofile von Digisonde, Assimilation (CHAMP) und initialem Modell (PIM) für bestimmte Koinzidenzen zwischen CHAMP und: **links:** Juliusruh, 20. Juni 2001, 06:43 UTC. **rechts:** Athen, 23. Juni 2001, 17:30 UTC.