

# Ein Kontinent erwacht – Induktionsanomalien langperiodischer erdmagnetischer Variationen in Europa

Ulrich Schmucker, Göttingen

## 1. Normale und anomale Anteile der beobachteten Variationen

Induktionsanomalien sind örtlich begrenzte Anomalien erdmagnetischer Variationen inneren Ursprungs. Sie erzeugen einen so definierten *anomalen* Anteil ( $\underline{B}_a$ ) des beobachteten Variationsfeldes ( $\underline{B}$ ) im Einflussbereich von lateralen Änderungen der Leitfähigkeit bis zu maximalen Tiefen, welche der jeweiligen Eindringtiefe entsprechen. Sie bewirken insbesondere auffallende Anomalien ( $B_{az}$ ) der Vertikalkomponente. Dort wo solche Anomalien fehlen, wird ein aus äußeren und inneren Anteilen gleichermaßen zusammengesetzter *normaler* Anteil  $\underline{B}_n = \underline{B} - \underline{B}_a$  beobachtet, wobei Variationen der Vertikalkomponente ( $B_{nz}$ ) auch über 1D Strukturen erscheinen. Da ihre Stärke bestimmt wird durch die Eindringtiefe im Verhältnis zu einer Skalenlänge für die räumliche Inhomogenität des Quellenfeldes, sind sie ein Merkmal lang-periodischer und damit tief eindringende Variationen.

Normale und anomale Variationen der Vertikalkomponente können getrennt oder gemeinsam für EM Sondierungen verwendet werden, indem man sie auf die Horizontalkomponenten bezieht, und zwar auf diejenigen des normalen Variationsfeldes ( $B_{nx}, B_{ny}$ ) und nicht wie sonst üblich auf jene des Gesamtfeldes ( $B_x, B_y$ ). In Abschnitt 5 wird ein kurzer Hinweis zur Bestimmung von  $B_{nx}$  und  $B_{ny}$  folgen. Die auszuwertenden linearen Beziehungen bezüglich von Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich lauten:

$$B_{nz} = C \cdot \left( \frac{\partial B_{nx}}{\partial x} + \frac{\partial B_{ny}}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$B_{az} = z_H B_{nx} + z_D B_{ny}, \quad (2)$$

$$B_z = B_{nz} + B_{az} = C \cdot \left( \frac{\partial B_{nx}}{\partial x} + \frac{\partial B_{ny}}{\partial y} \right) + z_H \cdot B_{nx} + z_D \cdot B_{ny}. \quad (3)$$

Gl. (1) ist die Grundgleichung des (Horizontal)-Gradienten Verfahren (HSG) zur Bestimmung der C-Response von 1D Strukturen, Gl. (2) diejenige der erdmagnetischen Tiefensondierung (ETS) zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen  $z_H$  und  $z_D$ , Gl. (3) die Kombination beider Ansätze. Die Beziehung zur skalaren 1D-Impedanz magnetotellurischer Sondierungen (MTS) lautet  $Z = i\omega C$ , während in  $z_H$  und  $z_D$  die räumlichen Ableitungen der Elemente der tensoriellen Impedanz  $\underline{\underline{Z}}^{TE}$  für das erdelektrische Feld in der TE Mode über 2D und 3D Strukturen enthalten sind.

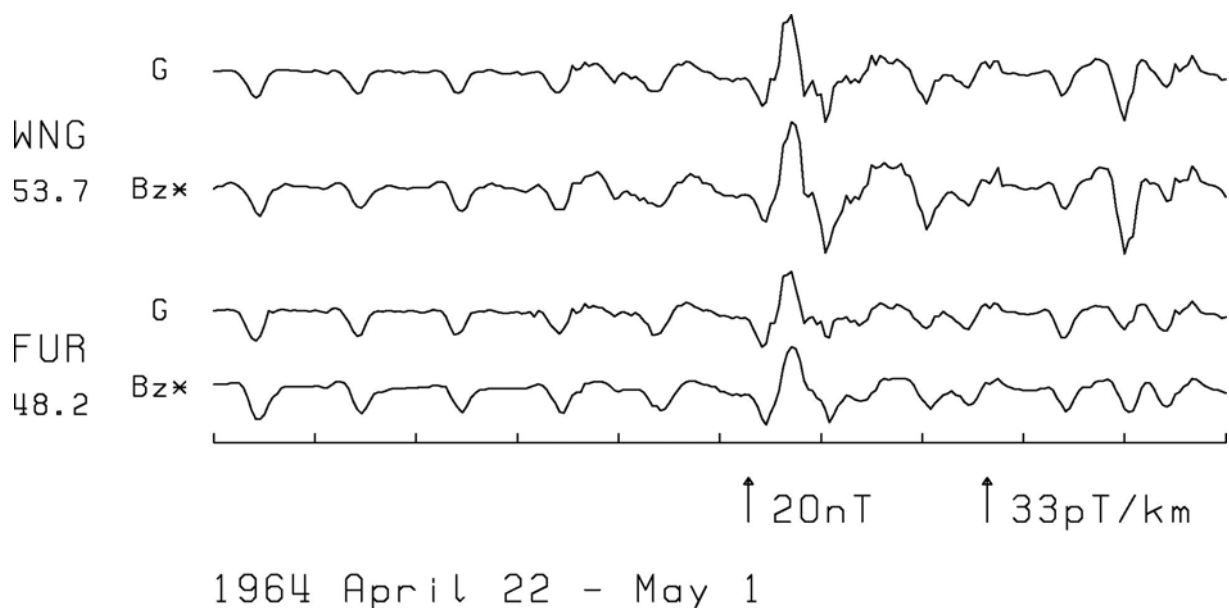
## 2. Frequenzabhängigkeiten

$B_{nz}$  wird bestimmt durch die Eindringtiefe und wächst daher mit abnehmender Frequenz, eine gleich bleibende Strukturierung des induzierenden Quellenfeldes vorausgesetzt. Für Induktionsanomalien ist der örtlich veränderte Fluss großräumig induzierter Ströme verantwortlich,  $B_{az}$  wird also unter gewissen vereinfachenden Voraussetzungen bestimmt durch die elektrischen Tangentialkomponenten des Normalfeldes im Verhältnis zu seinen orthogonalen magnetischen Horizontalkomponenten, also durch die genannte 1D-Impedanz. Diese strebt mit abnehmender Frequenz gegen Null und Gleiches gilt für die Induktionsanomalien. Im Falle eines homogenen Halbraums für die Normalstruktur und  $C \propto 1/\sqrt{\omega}$  klingt  $Z$  mit  $\sqrt{\omega}$  ab, doch bewirkt die starke Zunahme der Leitfähigkeit im tieferen Erdmantel eine abgeschwächte Zunahme von  $C$  mit abnehmender Frequenz.

## 3. Normale und anomale Anteile langperiodischer Variationen

Die genannten gegenläufigen Frequenzabhängigkeiten von  $Z$  und  $C$  bewirken, dass zumindest außerhalb der Polarlichtzone für kurzperiodische Variationen (Pulsationen, Bays) der anomale Anteil das Erscheinungsbild von  $B_z$  prägt, während bei den langperiodischen Variationen ( $S_q, S_d$ ) und ( $DS, D_{st}$ ) der normale Anteil überwiegt. Nur im Fall extremer und oberflächennaher Leitfähigkeitsunterschiede, wie etwa an Meeresküsten, bleiben Induktionsanomalien bis zu Perioden von einem Tag und länger in den Magnetogrammen der Vertikalkomponente sichtbar.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die an zwei Observatorien in Nord- und Süddeutschland beobachteten Variationen der Vertikalkomponente für ein Zeitintervall von zehn Tagen, und zwar gemeinsam mit den für diese Observatorien berechneten Horizontal-Gradienten  $G = \partial B_{nx} / \partial x + \partial B_{ny} / \partial y$ . Es handelt sich dabei um die Observatorien FUR=Fürstenfeldbruck bei München und WNG=Wingst bei Hamburg. Die Skalierung ist so gewählt, dass beide Zeitreihen in der Abwesenheit von Induktionsanomalien gleich aussehen würden, wenn der



Erdmantel in 600km Tiefe ideal-leitend wäre und darüber nicht-leitend. Der sehr ähnliche Verlauf beider Zeitreihen deutet an, dass  $B_z$  an beiden Orten allein auf Induktion in einer lateral-homogenen 1D-Normalstruktur für den Erdmantel beruht. Trotzdem wird sich im Folgenden für WNG, aber nicht für FUR, ein anomales  $B_{az}$  nachweisen lassen.

#### 4. Multivariate Analysen

Wenn in dem zu untersuchenden Periodenbereich mit einem signifikanten Normalanteil  $B_{nz}$  in der Vertikalkomponente zu rechnen ist, erfordert eine erdmagnetische Tiefensondierung entweder eine vorangehende Abtrennung von  $B_{nz}$  mittels einer vorgegebenen Normalstruktur oder aber die Sondierung wird gemäß Gl. (3) in Verbindung mit dem Gradienten-Verfahren durchgeführt. Da jedoch im 2D oder 3D-Fall die skalare 1D-Impedanz durch eine tensorielle Impedanz zu ersetzen ist, gilt Gleiches auch für die C-Response. Die entsprechend erweiterte lineare Beziehung für  $B_z$  enthält dann zusätzlich zu den beiden ETS Übertragungsfunktionen drei Übertragungsfunktionen für eine tensorielle C-Response  $\underline{\underline{C}} = (C_{kl}) = \underline{\underline{Z}}^{TE} / i\omega$ . Eine zweckmäßige Formulierung dieses Ansatzes lautet:

$$B_z = C_1 \cdot \left( \frac{\partial B_{nx}}{\partial x} + \frac{\partial B_{ny}}{\partial y} \right) + C_2 \cdot \left( \frac{\partial B_{ny}}{\partial y} - \frac{\partial B_{nx}}{\partial x} \right) + C_3 \cdot \frac{\partial B_{nx}}{\partial y} + z_H \cdot B_{nx} + z_D \cdot B_{ny} \quad (4)$$

mit

$$C_1 = (C_{xy} - C_{yx}) / 2, \quad C_2 = (C_{xy} + C_{yx}) / 2, \quad C_3 = (C_{xx} - C_{yy}). \quad (5)$$

Hierin ist  $C_1$  eine dem *Berdichevsky average* entsprechende Übertragungsfunktion für die dreh-invariante Differenz der Nebendiagonalelemente,  $C_2$  ein Maß für die Anisotropie von  $\underline{\underline{C}}$  und  $C_3$  ein Maß für 3D-Effekte. Die dreh-invariante Summe der Diagonalelemente bleibt unbestimmt infolge der Potentialbedingung für das magnetische Variationsfeld im Luftraum. Man erhält Gl. (4), indem die tensoriellen Impedanzbeziehungen für die TE Mode nach den räumlichen Koordinaten  $x$  und  $y$  differenziert und in geeigneter Weise kombiniert werden.

Eine Auswertung von Gl. (4) erfordert eine multivariate Regression bezüglich der in ihr enthaltenen fünf Übertragungsfunktionen. Diese hat sich als grundsätzlich durchführbar erwiesen, allerdings in der Regel mit einer regularisierten Inversion der  $5 \times 5$  Spektralmatrix. Es hat sich aber gezeigt, dass eine Auswertung gemäß Gl. (3) zumindest für die ETS Übertragungsfunktionen ausreicht. Die dann notwendige Inversion einer  $3 \times 3$  Spektralmatrix lässt sich problemlos ohne Regularisierung durchführen.

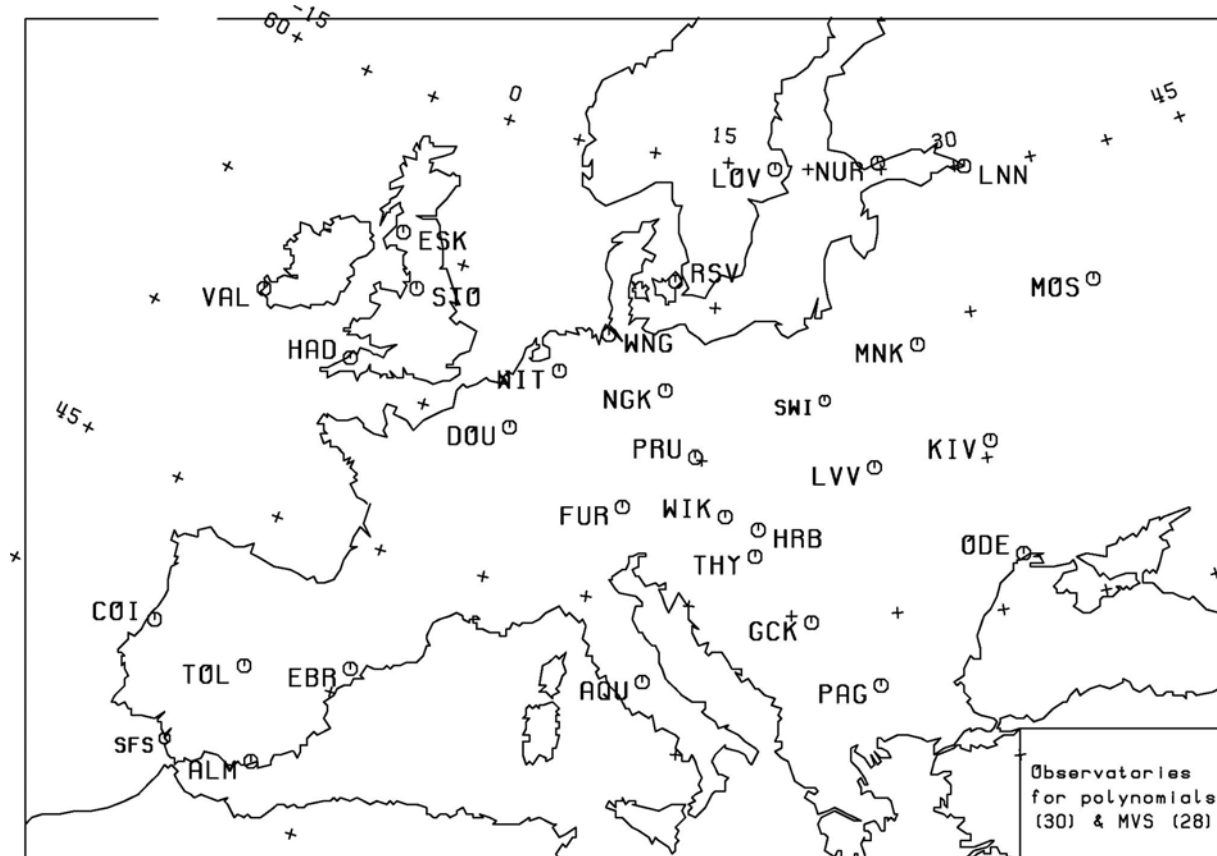
Die grundsätzliche Schwierigkeit multivariater Regressionen besteht darin, dass die Eingabe-Variablen auf den rechten Seiten nur schwach miteinander korreliert sein dürfen. Diese Vorbedingung wird insbesondere durch lineare Beziehungen verletzt, die zwischen den Horizontalkomponenten und ihren räumlichen Ableitungen dann auftreten, wenn das induzierende äußere Quellenfeld räumlich und zeitlich zu einfach strukturiert ist. Aus diesem Grunde führt die Analyse des spektralen Kontinuums zwischen den  $S_q$ -Linien zu konsistenteren Ergebnissen als die Analyse von  $S_q$  selbst mit einer von Tag zu Tag etwa gleich bleibenden räumlichen Struktur in mittleren Breiten. Im Gegensatz hierzu besitzt das

durch die magnetische Aktivität bestimmte Kontinuum stark wechselnd strukturierte induzierende Felder mit Quellen in der Polarlichtzone.

## 5. Datenauswahl und Bearbeitung

In der Analyse des Kontinuums, auf welche sich die nachfolgend gezeigten Ergebnisse beschränken, werden für eine lückenlose Folge von 10-Tage-Intervallen geglättete Spektren zu den acht Mittenfrequenzen  $0.5cpd$ ,  $1.5cpd$ , ...,  $7.5cpd$  gebildet und anschließend über alle Intervalle gewichtet addiert. Aus den so gebildeten Spektren werden sodann die Schätzwerte der Übertragungsfunktionen abgeleitet, zusammen mit ihren Vertrauensbereichen für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 32 %, wobei im Falle 5-variater Regressionen *jack-knife errors* berechnet werden. Die  $S_q$ -Variationen des jeweiligen Monats sind zuvor abgezogen worden.

Die analysierten Zeitreihen bestehen aus den Stundenmittelwerten der Jahre 1964-65 nach Beobachtungen an 30 europäischen Observatorien, die Nyquist-Frequenz beträgt also 12 cpd. Innerhalb der 731 Tage dieser beiden Jahre lassen sich 72 10-Tage-Intervalle bilden. Für die Harmonischen jedes Intervalls im Frequenzabstand von 0.1 cpd werden Polynome mittels einer Ausgleichsrechnung bestimmt, welche die Fourierkoeffizienten für die beiden Horizontalkomponenten an allen 30 Observatorien näherungsweise wiedergeben. Für jedes Observatorium und jede Harmonische werden sodann aus diesen Polynomen die Horizontalkomponenten und die räumlichen Ableitungen des so definierten Normalfeldes gewonnen. Da die Polynomannpassung ohne Regularisierung in sphärischen Koordinaten erfolgen soll, werden 2-dimensionale quadratische Polynome verwendet. Diese Beschränkung bewirkt zugleich eine angemessene räumliche Glättung des Normalfeldes. Die Positionen und Akronyme der verwendeten Observatorien sind der nachfolgenden Europa-Karte zu entnehmen.

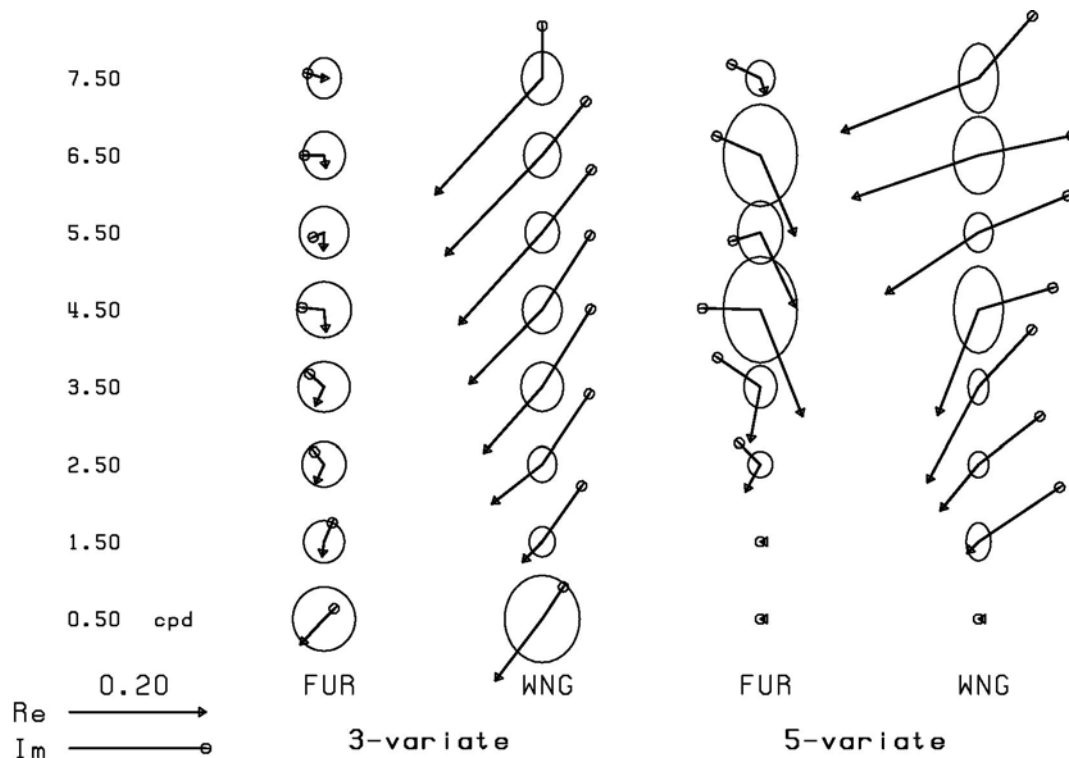


## 6. ETS Ergebnisse für die deutschen Observatorien FUR und WNG

Die graphische Darstellung der Real- und Imaginärteile der ETS Übertragungsfunktionen erfolgt mit Induktionspfeilen in den Definitionen

$$\underline{c}_{\text{Re}} = -\text{Re}(z_H)\underline{\hat{x}} - \text{Re}(z_D)\underline{\hat{y}} \quad (\text{Parkinson}), \quad \underline{c}_{\text{Im}} = +\text{Im}(z_H)\underline{\hat{x}} + \text{Im}(z_D)\underline{\hat{y}} \quad (\text{Wiese}). \quad (6)$$

Der Vorzeichenwechsel für den Realteil hat allein zeichentechnische Gründe. Es folgt zunächst eine spaltenweise Darstellung dieser Pfeile für die acht Frequenzen des Kontinuums nach Beobachtungen an den genannten Observatorien, links für 3-variante Regressionen nach Gl. (3) und rechts für 5-variante Regressionen nach Gl. (4). Es ergeben sich vergleichbare Induktionspfeile innerhalb der durch die Ellipsen angezeigten Fehlergrenzen, doch zeigen die aus einer 3-varianten Analyse gewonnenen Pfeile nach Richtung und Länge gleichmäßigere Änderungen von Frequenz zu Frequenz. Außerdem werden für die ersten beiden Mittenfrequenzen die Grenzen von 5-varianten Regressionen sichtbar. Die fehlenden Pfeile für 0.5 cpd und 1.5 cpd (nur FUR) wären mit nicht darstellbaren Fehlerellipsen verbunden.



Den links gezeigten ETS Ergebnissen ist Folgendes zu entnehmen: Die Analyse der  $B_z$ -Variationen lässt keinen signifikanten Einfluss einer Induktionsanomalie für FUR erkennen, wohl aber für WNG. Realpfeile weisen für dieses an der Elbmündung gelegene Observatorium einheitlich nach Südwesten und Imaginärpfeile in Gegenrichtung, was auf eine lang gestreckte schlecht leitende Struktur nordöstlich von WNG hindeutet oder auf eine gut leitende Struktur in Südwesten, beide mit Streichrichtungen nach Südosten. Die durch das Längenverhältnis der Pfeile ausgedrückte Phase erniedrigt sich von fast  $70^\circ$  bei 1.5 cpd ( $T=16\text{h}$ ) stetig auf etwa  $25^\circ$  bei 6.5 cpd ( $T=3.7\text{h}$ ), wie es bei einer oberflächlichen Leitfähigkeitsanomalie zu erwarten ist, während sich die durch  $\sqrt{|z_H|^2 + |z_D|^2}$  ausgedrückte Größe der Anomalie etwa verdoppelt. Dies entspricht sehr genau dem aus dem

Frequenzverhältnis abgeleiteten Anstieg von  $\sqrt{6.5/1.5} = 2.08$  für eine Normalstruktur konstanter Leitfähigkeit gemäß Abschnitt 2 und scheint anzudeuten, dass die induktive Kopplung auf den in seiner Leitfähigkeit mehr oder weniger homogenen oberen Mantel beschränkt ist.

## ----- Ein Kontinent erwacht -----

Die ETS Ergebnisse nach Gl. (3) werden abschließend für die acht Frequenzen der Spektralanalyse des Kontinuums auf Europa-Karten dargestellt. Sie zeigen Frequenz für Frequenz die Induktionspfeile für 28 der 30 Observatorien, die für die Polynomdarstellungen verwendet wurden. Die  $B_z$ -Variationen von Swider (SWI) erwiesen sich als zu stark gestört, diejenigen von Odessa (ODE) als instabil, San Fernando (SFS) registriert nur die Horizontalkomponenten. Jede Karte enthält oben links die gleich bleibende Skalierung der Pfeile und rechts unten eine Legende mit der in Perioden umgerechneten Mittenfrequenz. Diese Darstellungen könnten der erste Versuch überhaupt sein, mit erdmagnetischen Tiefensondierungen in den Periodenbereich jenseits von Bay-Störungen vorzudringen - angesichts eines den Einfluss von Induktionsanomalien mehr und mehr verdeckenden Normalanteils in den beobachteten  $B_z$ -Variationen. Bemerkenswert ist, dass in den Karten eine gute Korrelierbarkeit der ETS Ergebnisse sichtbar wird, sowohl von Ort zu Ort als auch von Frequenz zu Frequenz. Jeder Betrachter möge aus ihnen seine eigenen Schlüsse ziehen. Hier nur einige Kurz-Kommentare mit  $z^* = \text{Re}\{C\}$  als Maß für die jeweilige Eindringtiefe:

**T=48h** ( $z^*=715\text{km}$ ): Noch keine signifikanten Induktionsanomalien irgendwo in Europa mit Ausnahme der Küstenregionen des Atlantiks und entlang der Stationskette RSV-WNG-WIT von Dänemark nach Holland.

**T=16h** ( $z^*=610\text{km}$ ): Küstenanomalien werden deutlicher sichtbar, und zwar zunächst in den Imaginärteilen, nicht nur am Atlantik sondern auch an der Mittelmeerküste Spaniens (!). Gleiches gilt für die Stationskette WIK-HRB-THY-GCK-PAG in Südosteuropa sowie für die Stationen LVV und KIV in der Ukraine.

**T=9.6h** ( $z^*=500\text{km}$ ): Allmähliches Anwachsen der Realpfeile an den Küsten und im küstennahen Hinterland. Auch in den küstenfernen Gebieten treten die Realteile teilweise aus den Fehlergrenzen heraus.

**T=6.9h** ( $z^*=415\text{km}$ ): In den Küstenregionen des Atlantik übertreffen nunmehr die noch einmal gewachsenen Realpfeile in ihren Längen die Imaginärpfeile, die Phase der Küstenanomalien sinkt unter  $45^\circ$ . Dies gilt aber nicht für die beiden spanischen Observatorien am Mittelmeer und auch nicht für die Anomalien im Inland.

**T=5.3h** ( $z^*=360\text{km}$ ): Langsames Verschwinden der Imaginärpfeile in den Küstenregionen des Atlantiks, aber nicht an den Küsten des Mittelmeers. Im Inland liegen die Phasen teils immer noch oberhalb, aber auch schon unterhalb von  $45^\circ$ . Die Anomalie von KIV ist kaum noch zu sehen.

**T=4.4h, 3.7h, 3.2h** ( $z^*=315, 280, 260\text{km}$ ): Die Küstenanomalien am Atlantik erreichen im Realteil ihre größten Werte, dazu passend die Annäherung an den Nulldurchgang der Imaginärteile. Starkes Abklingen der Küstenanomalien landeinwärts infolge der geringer

werdenden Eindringtiefen. Am Mittelmeer Phasen immer noch bei  $45^\circ$ , im Inland jetzt in der Regel darunter liegend. Dies gilt auch für die stark hervortretende Anomalie entlang der Linie RSV-WNG-WIT. Ganz im Osten erscheinen neue Anomalien in LNN und MOS.

