

Kapitel 5

Ergebnisse - Analyse der Herzraten-Variabilität

5.1 Poincaré-Maps

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der Poincaré-Maps der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Nicht-trainierende Probanden weisen einen Anstieg der Herzfrequenz bereits ab der zweiten Woche auf.
2. Trainierende Probanden verzeichnen keinen oder nur geringen Anstieg der Herzfrequenz.
3. Nicht-trainierende Probanden weisen teilweise eine zunehmende Verdichtung der RR-Variabilität auf.
4. Nicht-trainierende Probanden verfügen im Gegensatz zu den trainierenden Probanden über eine geringere Variabilität bereits ab der zweiten Woche.

Die Poincaré-Maps zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen der trainierenden und der nicht-trainierenden Probandengruppe (vgl. dazu Abbildung 5.1). Die trainierenden Probanden (A)¹ und (B) zeigen nur eine geringe Verschiebung der Punktwolken im Laufe der Wochen entlang der Hauptdiagonalen des dreidimensionalen Diagrammes. Die Variabilität bleibt gleich konzentrisch und zeigt kaum eine Veränderung im Laufe der acht Wochen. Das Diagramm zeigt Attraktoren mit erhöhten chaotischen Verläufen, die Punktwolken sind nur schwer voneinander zu trennen. Auffallend bei Proband (A) das erhöhte chaotische Verhalten der IBI's. Die Variabilität bleibt im Laufe der Wochen nahezu konstant.

Die nicht-trainierenden Probanden (C) und (D) zeigen eine klare Verschiebung der Punktwolken im Laufe der acht Wochen entlang der Hauptdiagonalen des dreidimensionalen Diagrammes in Richtung höhere Frequenzen. Im Gegensatz zu den trainierenden Probanden lassen sich die Punktwolken der Wochen klar voneinander trennen. Während (C) gleich konzentrisch bleibt, weist (D) eine Verdichtung der Punktwolken während der Langzeit-Immobilität auf. Ähnliches Verhalten der Punktwolken lässt sich bei weiteren nicht-trainierenden Probanden feststellen. Die Dynamik der Attraktoren erscheint im Vergleich zu den trainierenden Probanden im Wochenvergleich reduziert. Die Variabilität weist eine abfallende Tendenz auf.

¹Bei Beginn der Studie verfügte dieser Proband über eine Pulsfrequenz von 35/min und war in der Lage die Atemluft bis zu 5 Minuten anzuhalten. Beruf: Tauchlehrer.

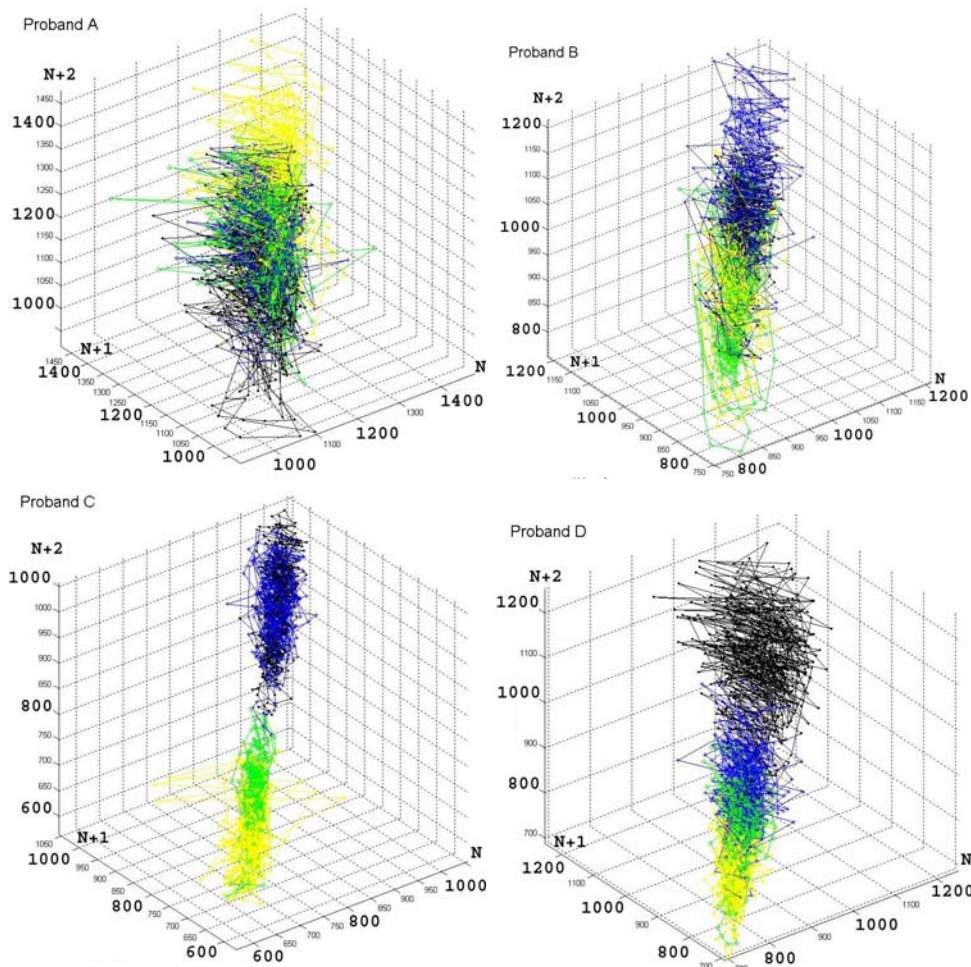


Abbildung 5.1: Poincaré-Maps der RR-IBI's für die Wochen: 2 (schwarz), 4 (blau), 6 (grün) und 8 (gelb). Oben links: trainierender Proband (A), oben rechts: trainierender Proband (B), unten links: nicht-trainierender Proband (C), unten rechts: nicht-trainierender Proband (D). Linke Spalte: Poincaré-Maps der IBI's für die Wochen: 2 (schwarz), 4 (blau), 6 (grün) und 8 (gelb). Rechte Spalte: Poincaré-Maps der IBI's für die Wochen: 0 (schwarz), 2 (blau), 4 (grün) und 6 (gelb).

5.2 Approximative Entropie (ApEn)

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der ApEn-Diagramme der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Kein signifikanter Unterschied zwischen trainierenden und nicht-trainierenden Probanden.
2. Kein Hinweis auf Veränderung des Informationsgehaltes in den RR-IBI im Laufe der Wochen.
3. Kein signifikanter Unterschied im Vergleich zu den ApEn der Puls-IBI.

Die Berechnung der Approximativen Entropie zeigte sowohl bei den trainierenden als auch bei den nicht-trainierenden Probanden keine signifikante Änderung (vgl. Abbildung 5.2). Es konnten sowohl keine wesentlichen Veränderungen im Laufe der unterschiedlichen Wochen, als auch Gruppenunterschiede festgestellt werden.

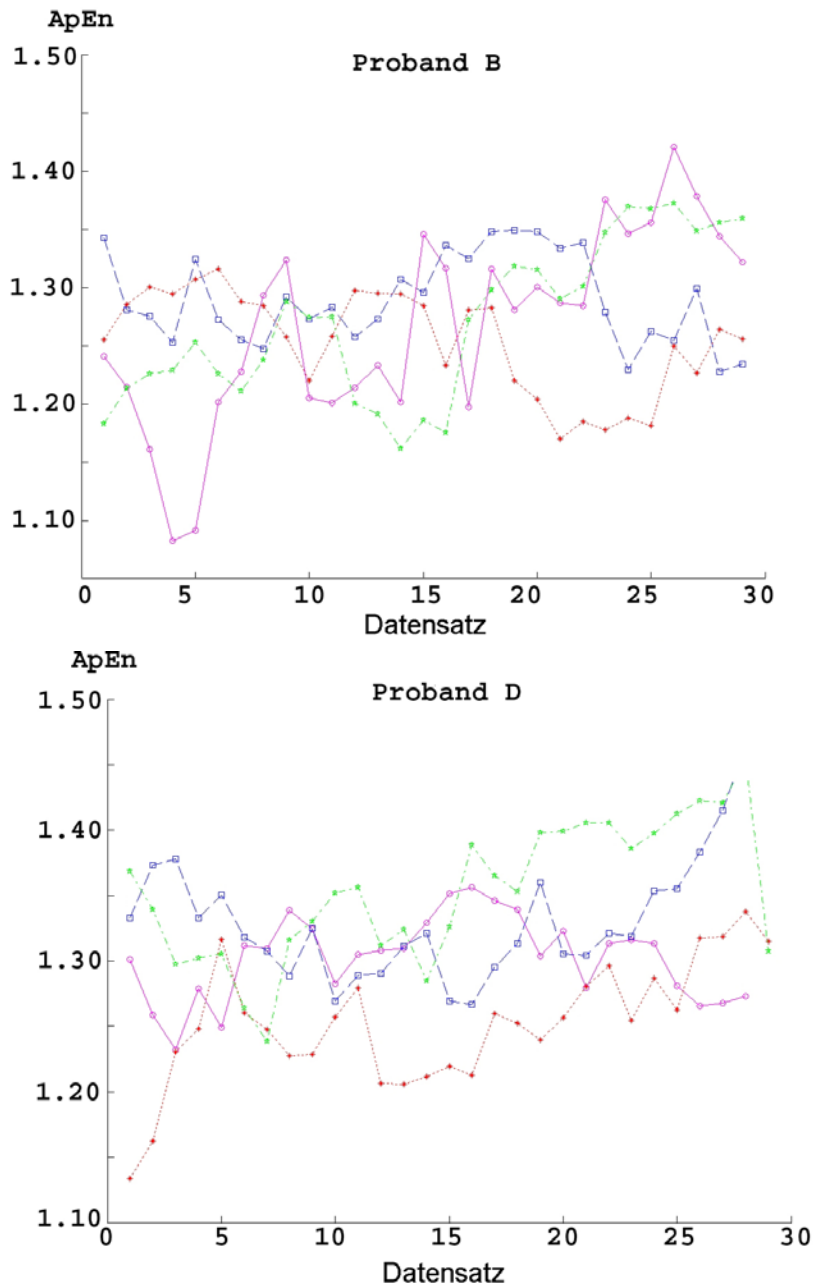


Abbildung 5.2: $ApEn$ -Diagramme für den RR -IBI-Wochenverlauf der einzelnen Probanden. Darstellung der Wochen: 2 (magenta, Kreis), 4 (blau, Quadrat), 6 (rot, Stern) und 8 (grün, Pentagramm). Oben: trainierender Proband. Unten: nicht-trainierender Proband.

5.3 Shannon-Entropie

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der Shannon-Entropie-Werte der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Kein signifikanter Unterschied zwischen trainierenden und nicht-trainierenden Probanden.
2. Kein Hinweis auf Veränderung des Informationsgehaltes in den RR-IBI im Laufe der Wochen.

Die Berechnung der Entropien nach Shannon zeigte keine signifikante Veränderung im Wochenverlauf (vgl. dazu Tabelle 5.1). Ebenso lässt sich kein Unterschied zwischen den beiden Gruppen der trainierenden und nicht-trainierenden Probanden nachweisen. Im Vergleich zu den Entropien der Arterien ist ebenfalls kein signifikanter Unterschied festzustellen (vgl. dazu Kapitel 6.3, Seite 73 ff.).

| | Probanden-Gruppe 1 | | | | Probanden-Gruppe 2 | | | |
|-------|--------------------|--------|-------------------|--------|--------------------|--------|-------------------|--------|
| | Trainierend | | Nicht-trainierend | | Trainierend | | Nicht-trainierend | |
| Woche | A | B | C | D | E | F | G | H |
| 2 | 5,2796 | 4,9261 | 4,9310 | 5,2188 | 4,5150 | 4,5818 | - | 4,3008 |
| 3 | 4,9134 | 5,0270 | 4,6263 | 4,6394 | 4,9363 | 4,8229 | 4,9726 | 4,6103 |
| 4 | 5,1464 | 5,2006 | 4,8770 | 4,8766 | 4,7707 | 4,7741 | 4,6649 | 4,3178 |
| 5 | 5,3566 | 4,9295 | 4,5322 | 4,6787 | 5,0315 | 4,7646 | 4,5925 | 4,5642 |
| 6 | 4,9235 | 5,0483 | 4,6984 | 4,8590 | 4,7842 | 4,5306 | 4,7080 | 4,4353 |
| 7 | 5,1371 | 4,7896 | 4,5584 | 4,4946 | 4,9422 | 4,7998 | 4,5934 | - |
| 8 | 5,1324 | 5,0995 | 4,5865 | 4,6419 | 4,8426 | - | 4,8340 | - |

Tabelle 5.1: Einzelentropien nach Shannon der RR-IBI's für die Wochen 2 bis 8. Trainierende Probanden: A,B,E,F. Nicht-trainierende Probanden: C,D,G,H. Für (-) markierte Zellen war keine Berechnung möglich.

5.4 Spektrogramme

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der Spektrogramme der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Nicht-trainierende Probanden weisen eine Verschiebung des Frequenzbandes bei 0.3 Hz in Richtung 0.15 Hz auf.
2. Trainierende Probanden weisen *keine* Verschiebung des Frequenzbandes bei 0.3 Hz in Richtung 0.15 Hz auf.
3. Trainierende Probanden verfügen über ein höheres Spektrum bei allen Frequenzen als nicht-trainierende Probanden.
4. Nicht-trainierende Probanden weisen eine Reduktion des Frequenzspektrums auf.
5. Zwischen trainierenden und nicht-trainierenden Probanden lassen sich deutliche Unterschiede erkennen.
6. Signifikante Ähnlichkeit zwischen RR-IBI und Puls-IBI (peripher und zentral).

Bei den Spektrogrammen lassen sich deutliche Unterschiede zwischen dem extrem sportlichen und trainierenden, den normalen trainierenden und den nicht-trainierenden Probanden feststellen (vgl. dazu Abbildung 5.4). Der sportliche und trainierende Proband weist eine stark unregelmässige jedoch vielfältige Frequenz- und Amplitudenverteilung auf. Während der Wochen ist eine Abnahme dieser Vielfältigkeit festzustellen. Es ist bei den normalen trainierenden und nicht-trainierenden Probanden ein Band bei 0.3 Hz zu erkennen, welches sich im Laufe der Wochen leicht zu den niedrigen Frequenzen verschiebt. Die nicht-trainierenden Probanden verfügen über eine geringere Vielfältigkeit der Frequenz- und Amplitudenverteilung. Im Gegensatz zu den trainierenden Probanden verschiebt sich jedoch das Frequenzband um 0.3 Hz wesentlich deutlicher zu den niedrigen Frequenzen. Sowohl bei den trainierenden als auch bei den nicht-trainierenden Probanden ist eine Abnahme der Frequenz- und Amplitudenverteilung im Wochenverlauf zu erkennen. Die Achseneinteilungen der Spektrogramme lassen sich der Abbildung 5.3 entnehmen.

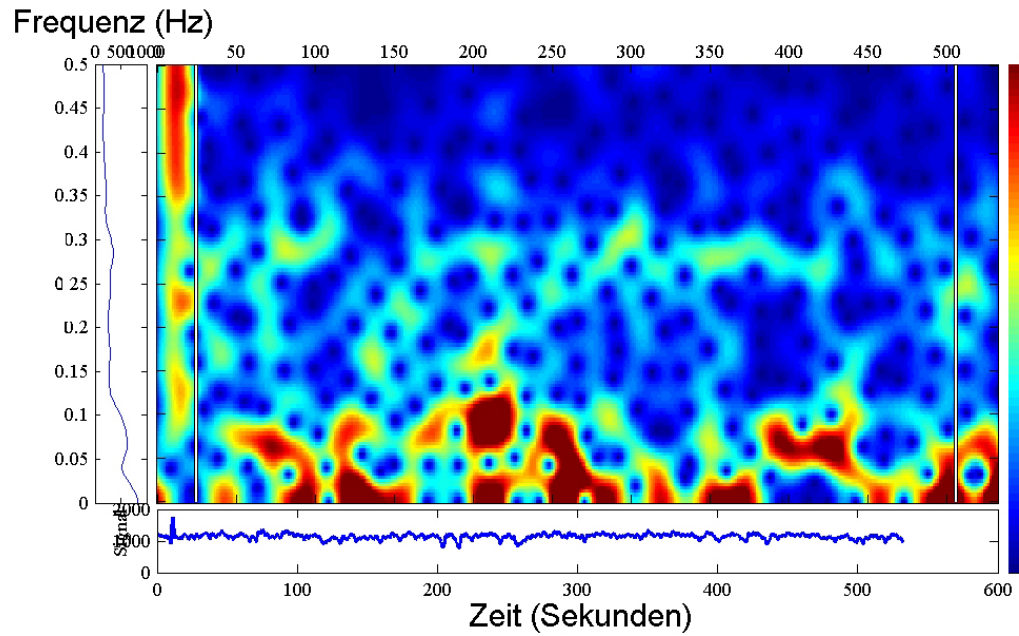


Abbildung 5.3: Achseneinteilungen der Spektrogramme. Ordinate: Frequenz (Hz), Abzisse: Zeit t (Sekunden).

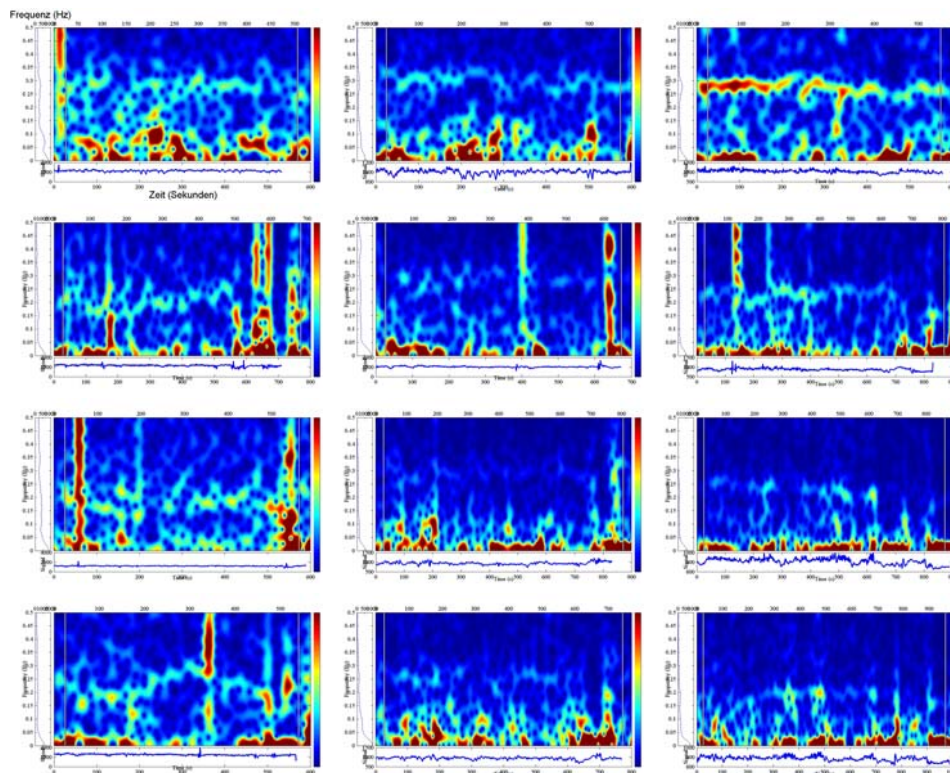


Abbildung 5.4: *Spektrogramme der RR-IBI's. Linke Spalte: trainierender Proband. Mittlere Spalte: normaler trainierender Proband. Rechte Spalte: nicht-trainierender Proband. Von oben nach unten: Wochen 2,4,6 und 8.*

5.5 3D-Skaleogramme

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der 3D-Skaleogramme der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. 3D-Skaleogramme sind für kurze IBI-Daten (< 1000 IBI) sehr schwer zu deuten.

Es lassen sich nur schwer Unterschiede bei den Skalierungen zwischen trainierenden und nicht-trainierenden Probanden bei den 3D-Skaleogrammen feststellen (vgl. dazu Abbildung 5.6). Nachfolgende Beschreibungen der 3D-Skaleogramme sind quantitativ beschrieben.

So bleibt bei den trainierenden Probanden die Amplitudenbildung im niedrigen Skalierungsbereich nahezu konstant, glättet sich jedoch im Wochenverlauf im hohen Skalierungsbereich, d.h. im hohen Skalierungsbereich ist eine Abnahme der Amplituden zu erkennen. Dagegen weisen die nicht-trainierenden Probanden eine Verminderung der Amplitudenhöhe im niedrigeren Skalierungsbereich auf.

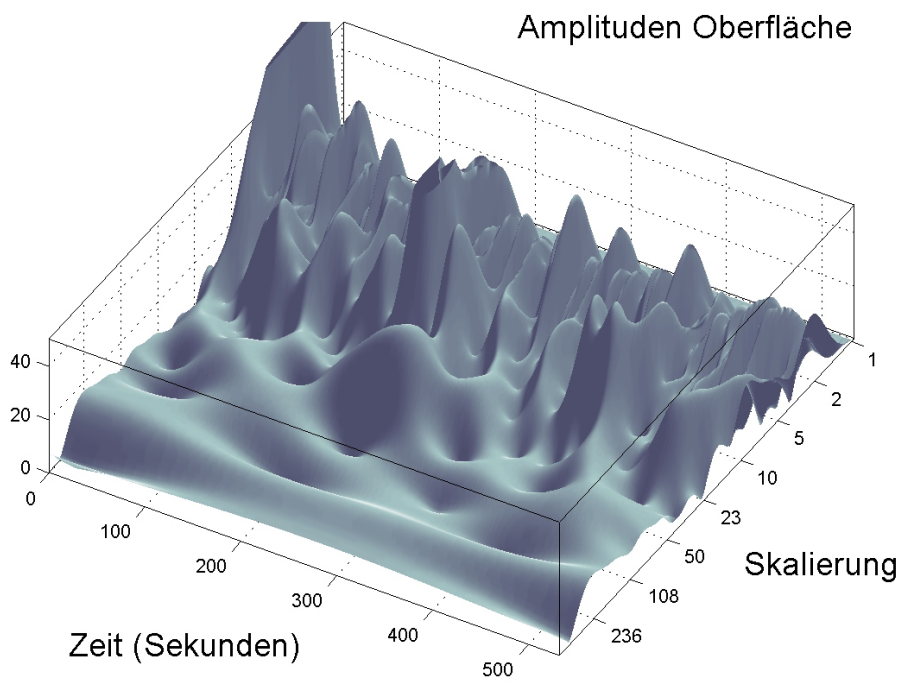


Abbildung 5.5: Achseneinteilungen der 3D-Skaleogramme.

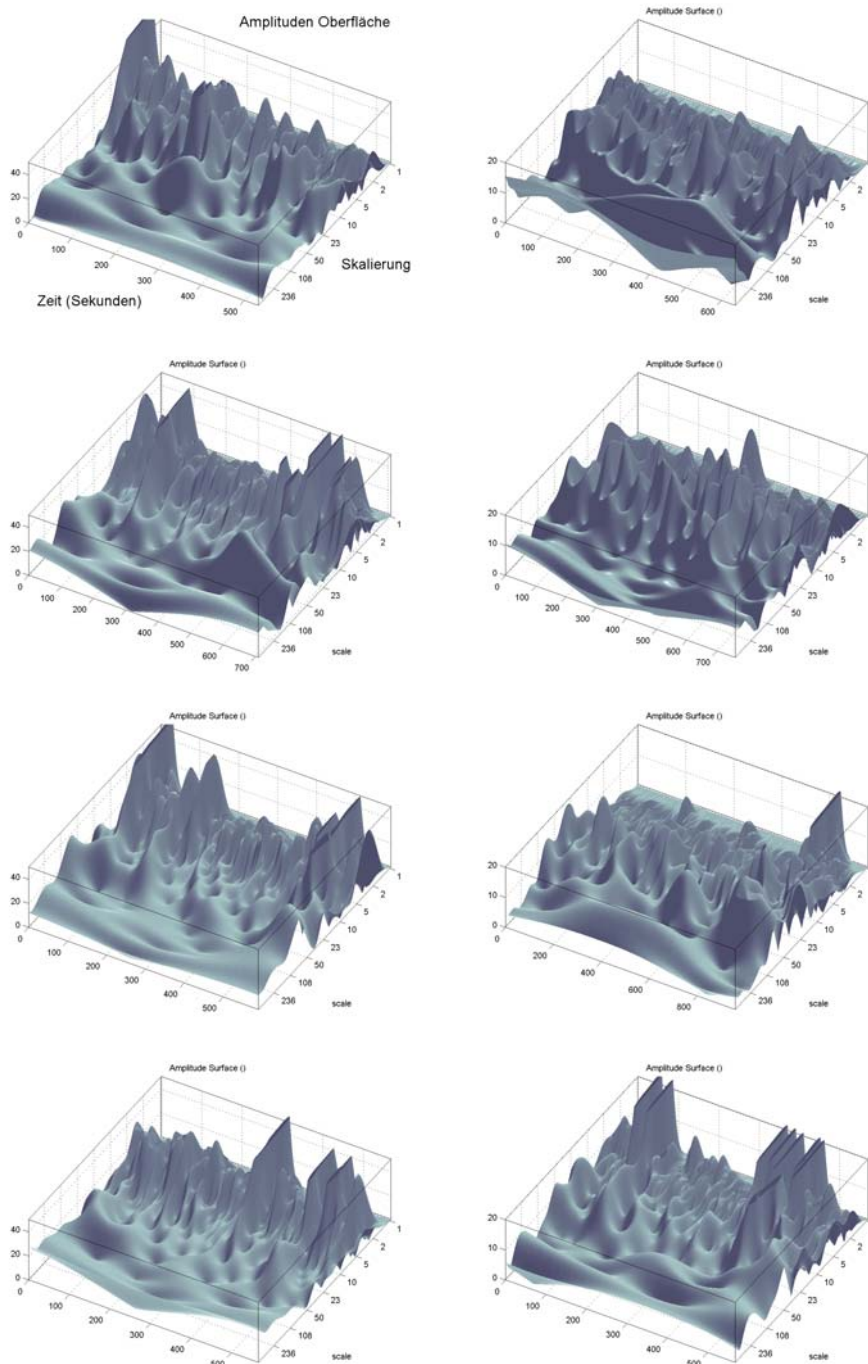


Abbildung 5.6: 3D-Skaleogramme der RR-IBI's. Linke Spalte von oben nach unten: trainierender Proband, Wochen 2,4,6,8. Rechte Spalte von oben nach unten: nicht-trainierender Proband, Wochen 2,4,6,8.

5.6 Spektralanalyse (param. AR Methode)

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der parametrischen AR Methoden der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Kein signifikanter Unterschied zwischen trainierenden und nicht-trainierenden Probanden.
2. Kein signifikanter Unterschied im Wochenverlauf der jeweiligen Probanden.

Im Vergleich der AR-Diagramme lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Diagrammen feststellen. Dies gilt für alle drei verwendeten Verfahren - Yule-Walker, Burg und Welch (vgl. dazu Abbildungen 5.7 bis 5.8). Es erscheint, dass sich der Peak um 0.3 Hz (vgl. dazu Abbildung 5.8, Welch-Methode) bei beiden Probandengruppen in Richtung 0.15 Hz im Laufe der Langzeit-Immobilisierung verschiebt.

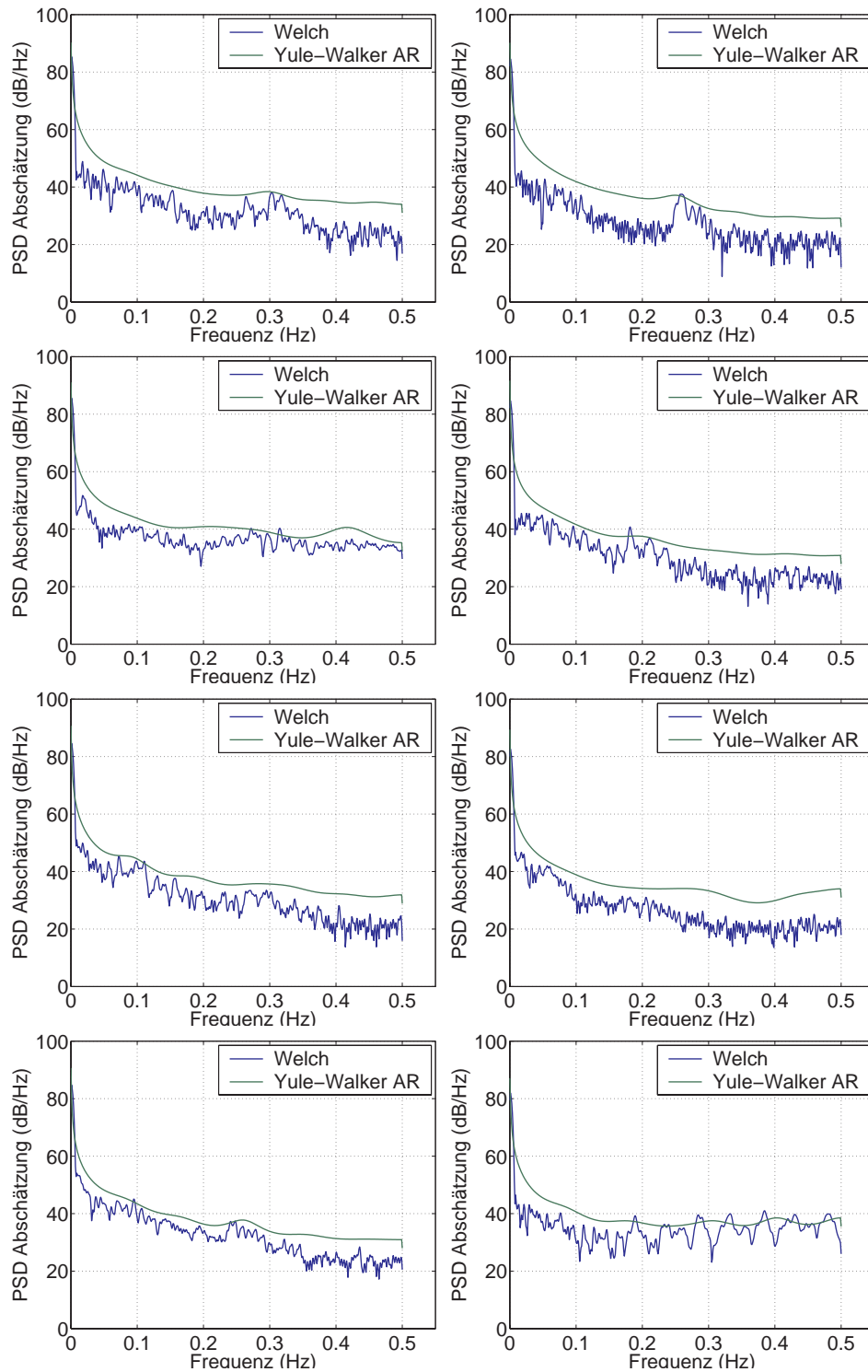


Abbildung 5.7: Parametrische AR Methodendiagramme der RR-IBI's. Linke Spalte: trainierender Proband (B). Rechte Spalte: nicht-trainierender Proband (C). Blau: Welch-Methode. Grün: Yule-Walker-AR. Von oben nach unten: Wochen 2,4,6,8.

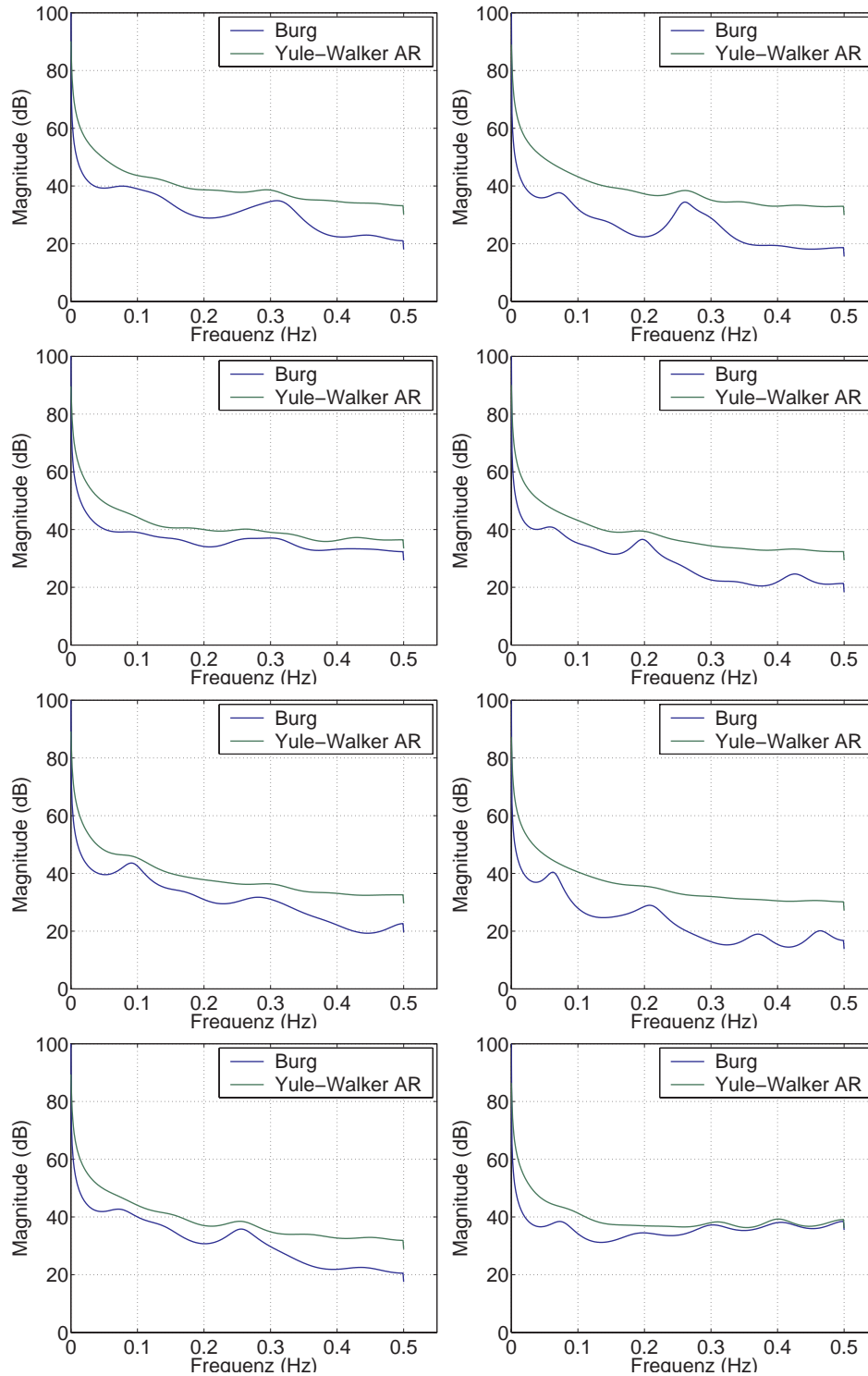


Abbildung 5.8: Parametrische AR Methodendiagramme der RR-IBI's. Linke Spalte: trainierender Proband (B). Rechte Spalte: nicht-trainierender Proband (C). Blau: Burg-Methode. Grün: Yule-Walker-AR. Von oben nach unten: Wochen 2,4,6,8.

5.7 HRV-Spektralanalyse

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der HRV-Spektralanalyse-Diagramme der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Konstantes Verhalten der VLF-, LF-, HF- und ULF-Power bei trainierenden Probanden.
2. Abnehmende Tendenz der VLF- und ULF-Power bei nicht-trainierenden Probanden.
3. Konstantes Verhalten der LF- und HF-Power bei nicht-trainierenden Probanden.
4. Keine signifikante Veränderung bei den Ratio's.
5. Wesentlich geringere Steigung des Verhältnisses (Ratio) $\frac{LF}{HF}$ im Vergleich zu der Ratio der RR-IBI.

Die trainierenden Probanden weisen im Laufe der Wochen eine gleich bleibende bis tendenziell leicht abnehmende VLF-Power auf (vgl. dazu Abbildung 5.9). LF-, HF- und ULF-Power bleiben - mit leichten Schwankungen - konstant. Bei den nicht-trainierenden Probanden ist bei der VLF- und der ULF-Power eine abnehmende Tendenz zu verzeichnen. Dabei fallen die einzelnen Power zuerst stark ab um dann in einem langsameren Abfall überzugehen. Die HF- und LF-Power bei nicht-trainierenden Probanden bleibt - mit Schwankungen - konstant.

Die Verhältnisse (Ratio's) $\frac{LF}{TP-VLF}$ und $\frac{HF}{TP-VLF}$ zeigen bei den trainierenden und nicht trainierenden Probanden ein konstantes Verhalten (vgl. dazu Abbildung 5.10). $\frac{LF}{HF}$ verfügt über eine leicht steigende Tendenz, dabei haben die nicht-trainierenden Probanden eine etwas deutlichere Steigung.

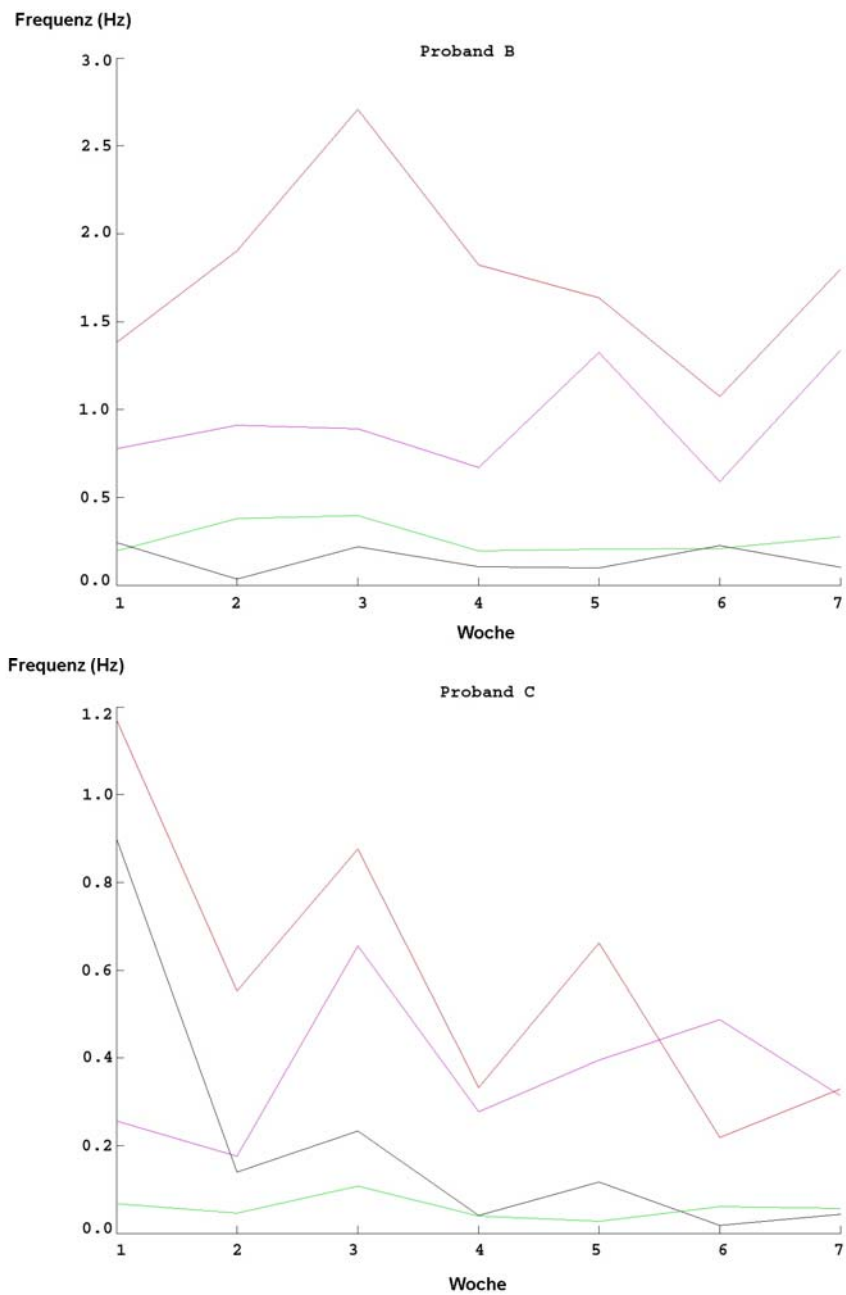


Abbildung 5.9: HRV-Spektralanalyse. Oben: trainierender Proband. Unten: nicht-trainierender Proband. Wochen 2 bis 8. Darstellung der LF-Power (lila), HF-Power (grün), VLF-Power (rot) und ULF-Power (schwarz).

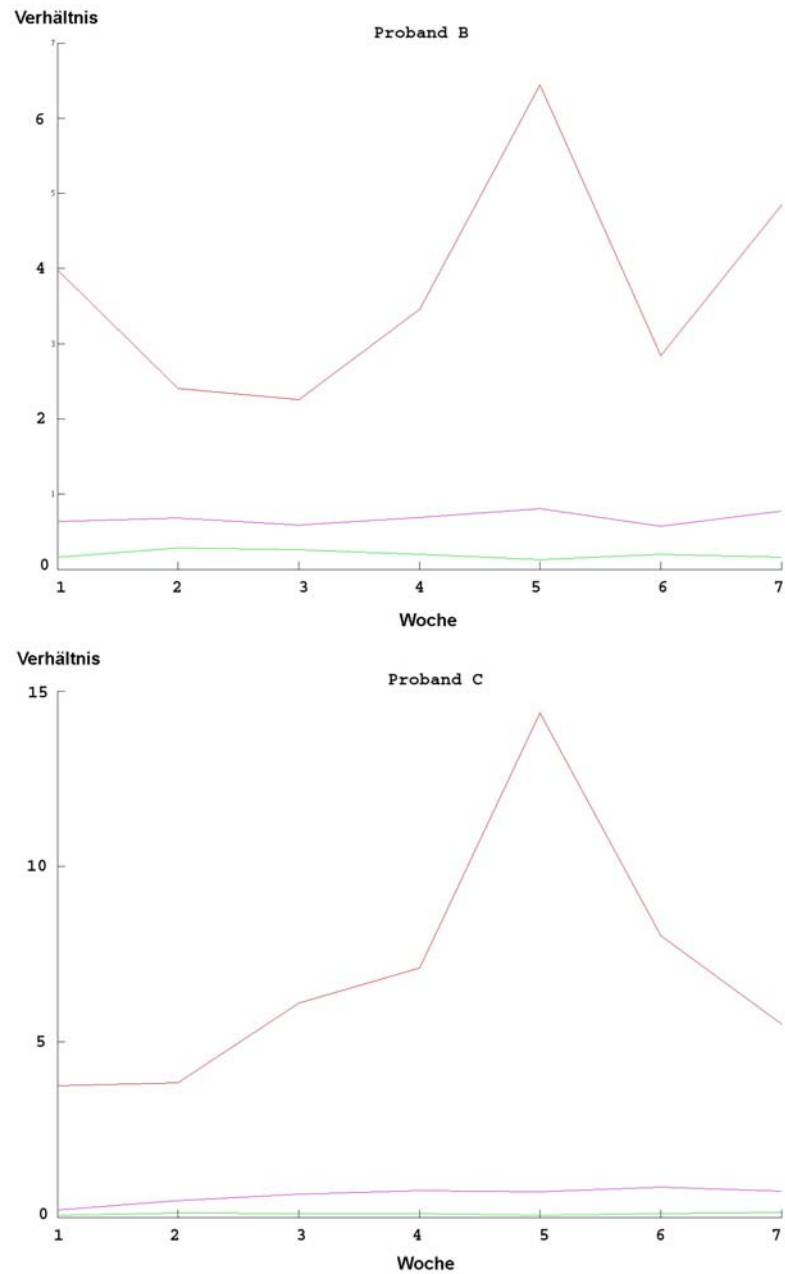


Abbildung 5.10: HRV-Spektralanalyse. Oben: trainierender Proband. Unten: nicht-trainierender Proband. Wochen 2 bis 8. Darstellung der $\frac{LF}{TP-VLF}$ - Ratio (lila), der $\frac{HF}{TP-VLF}$ - Ratio (grün) und der $\frac{LF}{HF}$ - Ratio (rot).

5.8 HRV-Time-Domain-Analyse

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der HRV-Time-Domain-Diagramme der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Abnehmende Tendenz der statistischen Werte SDNN, HR-TI und RMSDD bei nicht-trainierenden Probanden.
2. Konstantes Verhalten der statistischen Werte SDNN und HR-TI bei trainierenden Probanden. Beim RMSDD nur schwer eine Aussage möglich.

Die Entwicklung der SDNN bleibt im Laufe der Liegezeit bei trainierenden Probanden nahezu konstant. Dagegen weist der HRV-TI eine leicht abfallenden Tendenz auf (vgl. dazu Abbildung 5.11). Nicht-trainierende Probanden zeigen eine abnehmende Tendenz der SDNN und des HRV-TI. Der RMSDD zeigt bei trainierenden Probanden keine deutliche Tendenz auf (vgl. dazu Abbildung 5.12). Dagegen ist bei nicht-trainierenden Probanden eine deutliche Abnahme der RMSDD im Laufe der Wochen festzustellen.

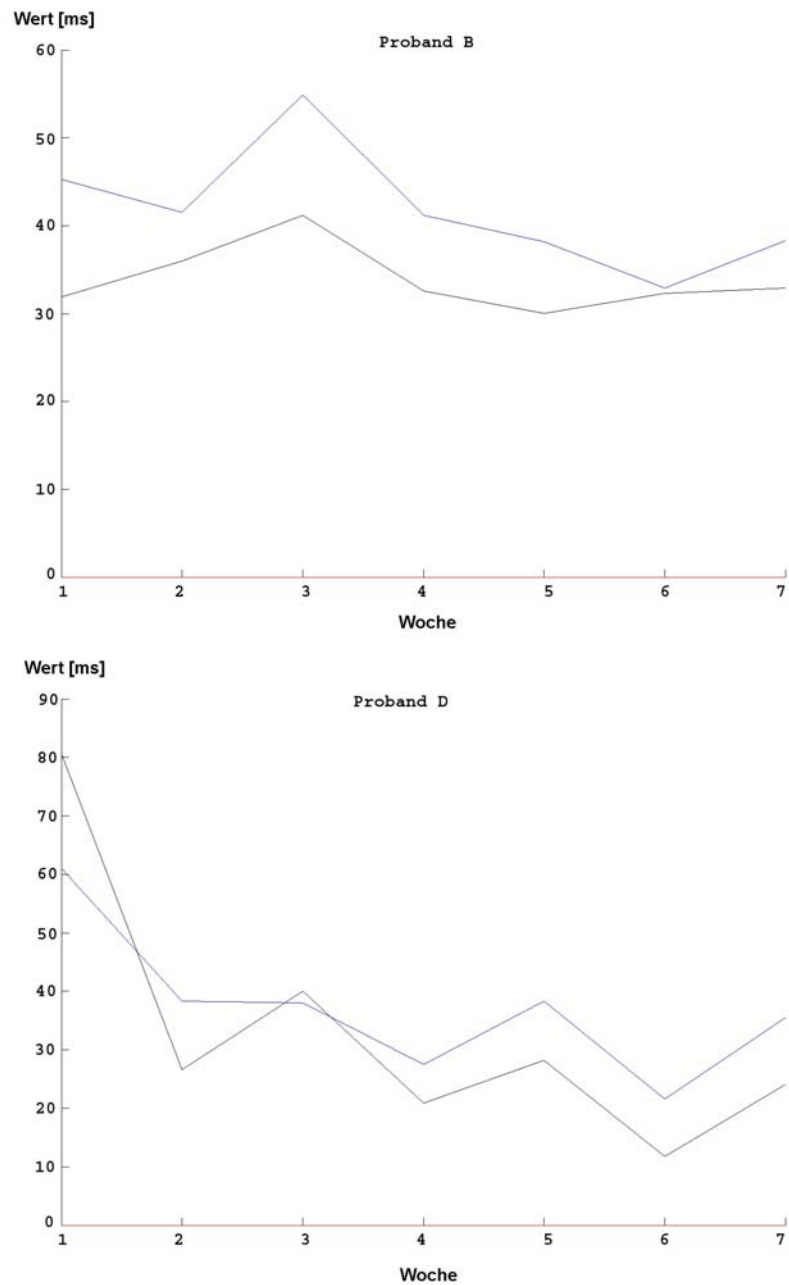


Abbildung 5.11: HRV-Time-Domain-Analyse. Oben: trainierender Proband. Unten: nicht-trainierender Proband. Wochen 2 bis 8. SDNN (schwarz) und HRV-TI (blau).

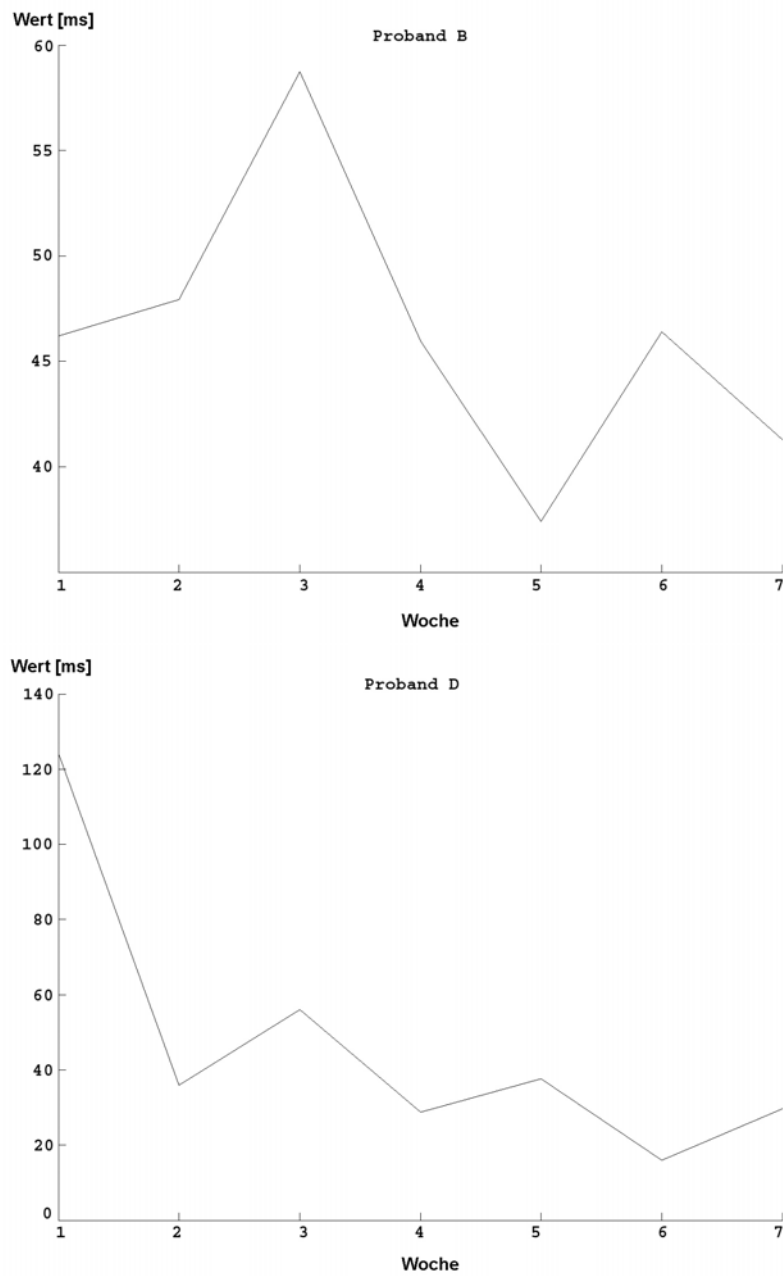


Abbildung 5.12: *HRV-Time-Domain-Analyse*. Oben: *trainierender Proband*. Unten: *nicht-trainierender Proband*. Wochen 2 bis 8. Unten: *nicht-trainierender Proband*. Wochen 2 bis 8. *RMSDD (schwarz)*.

5.9 Histogramme

Zusammenfassend führt bei Langzeit-Immobilität die Analyse der Histogramme der RR-IBI Daten zu den folgenden Ergebnissen:

1. Konstante Verteilung der IBI bei trainierenden Probanden.
2. Verlangsamung der Herzfrequenz bei trainierenden Probanden.
3. Verdichtung der Verteilung der IBI bei nicht-trainierenden Probanden.
4. Beschleunigung der Herzfrequenz bei nicht-trainierenden Probanden.
5. Glättung der Verteilungsfunktion bei nicht-trainierenden Probanden.

Die Histogramme der nicht-trainierenden Probanden zeigen einen klaren Unterschied zu denen der trainierenden (vgl. dazu Abbildung 5.13). Während die trainierenden Probanden kaum eine Veränderung der Gauß-Ausgleichskurve (Fitkurve) aufweisen, zeigen die nicht-trainierenden Probanden im Laufe der Wochen eine Annäherung (Glättung) an eine Gauß'sche Glockenkurve. Im Vergleich zu den Histogrammen der Arterien lassen sich Ähnlichkeiten feststellen. Es weichen jedoch die Histogramme der trainierenden Probanden signifikant voneinander ab, welches durch die wesentlich stärkere statistische Verteilung bei den RR-IBI's im Gegensatz zu denen der Pulswellen hervorgehoben wird (vgl. dazu Kapitel 6.9, Seite 98 ff.). Bei den nicht-trainierenden Probanden ist links ein flacherer Anstieg als rechts zu erkennen, der sich im Laufe der Liegedauer reduziert.

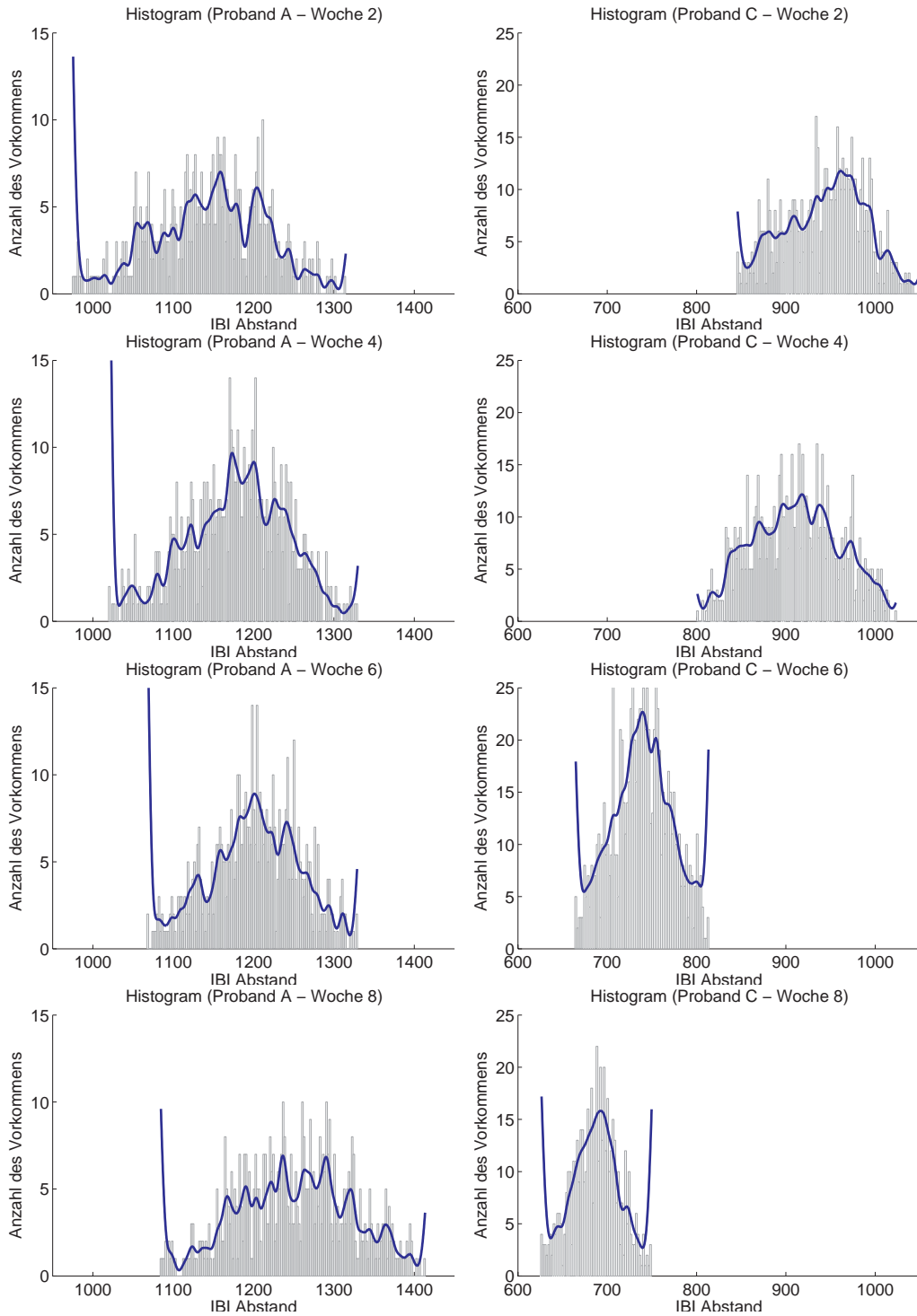


Abbildung 5.13: *Histogramme. Linke Spalte: trainierend. Rechte Spalte: nicht-trainierend. Von oben nach unten: Wochen 2,4,6 und 8.*

