

3. Ergebnisse

3.1. Echokardiographie, Blutdruckmessung und Infarktgrößenbestimmung

Am Ende der Studie (4 Wochen nach Infarktereignis) fanden die Echokardiographie, die Blutdruckmessung und die makroskopische Infarktgrößenbestimmung statt. Die Ergebnisse sind in den Tab. 2-4 zusammengefasst.

In der Echokardiographie (n = 13) unterschieden sich die Dicke des Interventrikularseptums und der linksventrikulären Hinterwand, der Diameter des linken Ventrikels in der Systole und Diastole der Infarkttiere hochsignifikant von der Kontrollgruppe (jeweils $p < 0,001$) (s. Tab. 2). Der Mittelwert der linksventrikulären prozentualen systolischen Verkürzungsfraction reduzierte sich bei den Infarkttieren um ein Drittel auf 15,82 ($\pm 2,04$) % ($p < 0,001$). Die linksventrikuläre Ejektionsfraction nahm hochsignifikant ($p < 0,001$) um die Hälfte auf 37,47 ($\pm 4,30$) % ab.

Die Blutdruckmessung zeigte 4 Wochen nach dem Infarkt keinen Unterschied zwischen den Gruppen (s. Tab. 3).

Der Mittelwert der Infarktgröße betrug bei 9 Ratten 1,93 ($\pm 0,03$) cm², das Größenverhältnis vom Infarkt zum linken Ventrikel erreichte 0,42 ($\pm 0,04$) (s. Tab. 4).

Echokardiographie

Parameter / Gruppe	IVS-Diastole (cm)	LV-Diastole (cm)	LVHW-Diastole (cm)	LV-Systole (cm)	LV%FS (%)	LVEF (%)
Infarkt n = 13	0,09 $\pm 0,010$	0,94 $\pm 0,09$	0,18 $\pm 0,02$	0,80 $\pm 0,09$	15,82 $\pm 2,04$	37,47 $\pm 4,30$
Kontrolle n = 13	0,14 $\pm 0,014$	0,79 $\pm 0,07$	0,16 $\pm 0,02$	0,39 $\pm 0,05$	50,65 $\pm 4,14$	86,05 $\pm 3,46$
p-Wert	< 0,001	< 0,001	0,034	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Tab. 2: Echokardiographie für die Infarkt- und Kontrollgruppe in der 4. Woche mit den Mittelwerten für die Parameter der Dicke des Interventrikularseptum (IVS) in der Diastole, des Diameters des linken Ventrikels (LV) in der Diastole, der Dicke der linksventrikulären Hinterwand (LVHW) in der Diastole, des Diameters des LV in der Systole, der linksventrikulären prozentualen systolischen Verkürzungsfraction (LV%FS) und der linksventrikulären Ejektionsfraction (LV EF) in Prozent. Mann-Whitney-U-Test.

Blutdruckmessung

	Blutdruckwert (mmHg)
Infarkt n = 13	126,92 ± 17,85
Kontrolle n = 13	125,90 ± 15,79
p-Wert	0,840

Tab. 3: Ergebnisse der nicht-invasiven Blutdruckmessung der Kontroll- und der Infarkttiere 4 Wochen nach Infarkt. Mann-Whitney-U-Test.

Infarktgröße

	Infarktgröße (in cm ²)	linke Ventrikelgröße (LV) (in cm ²)	Infarkt : LV (relative Einheit)
Infarkt n = 9	1,93 ± 0,03	4,58 ± 0,62	0,42 ± 0,04

Tab. 4: Makroskopische Infarktgrößenbestimmung nach 4 Wochen: Infarktgröße und Größe des linken Ventrikels (in cm²), Verhältnis Infarktgröße zur linken Ventrikelgröße (LV).

3.2. Magnetokardiographie**3.2.1. Das magnetokardiographische Bild des gesunden Rattenherzens**

Das normale magnetokardiographische Bild der Ratte (n = 11) wies im Intervall QRS_{Gesamt} einen IHi von 20,10 (± 3,26) auf (s. Tab. 5). Zum Zeitpunkt R_{Spitze} lag er bei 38,77 (± 9,13). In der STT-Strecke (STT) zeigte sich der IHi bei 14,64 (± 3,41) und am T-Wellen-Ende (T_{Ende}) bei 4,48 (± 1,36).

Max-min ergab während dem Intervall QRS_{Gesamt} einen Wert von 8,61 (± 0,89) pT. Sein Wert halbierte sich in R_{Spitze} (16,89 ± 2,59 pT). In STT betrug er 6,13 (± 1,23) pT und bei T_{Ende} 1,87 (± 0,50) pT.

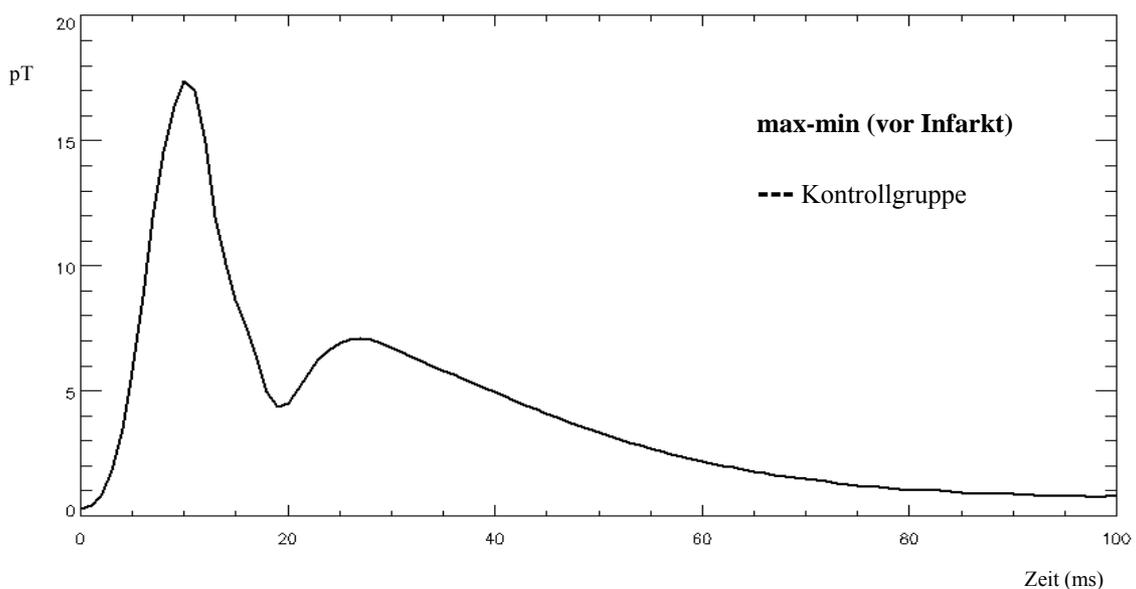
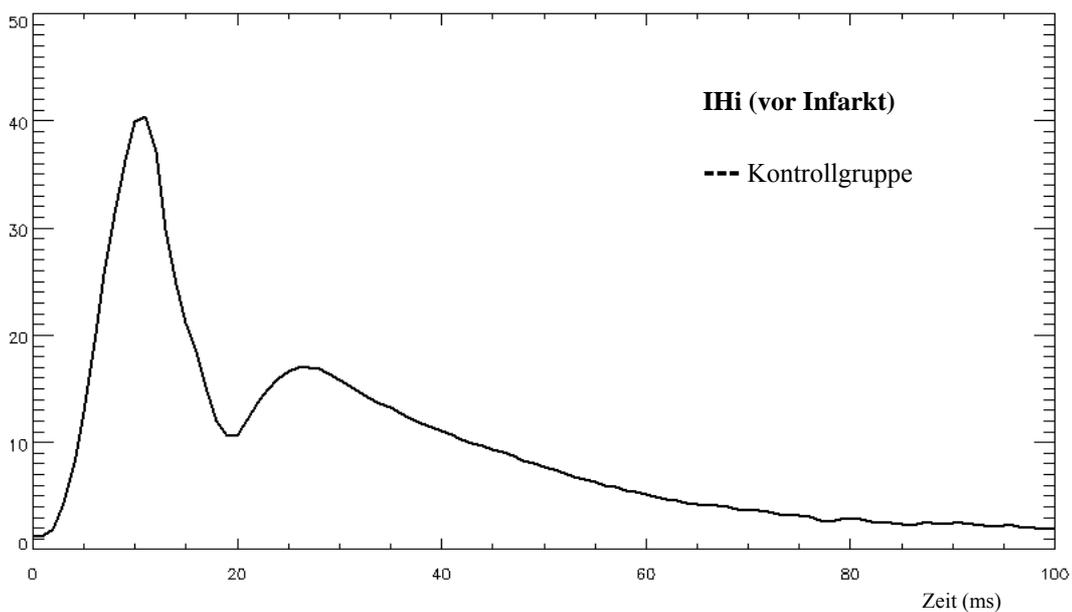
Die Gradzahl des Winkels lag im QRS_{Gesamt} bei $240,35 (\pm 17,41)$, zum Zeitpunkt R_{Spitze} bei $288,87 (\pm 15,23)$ und im Intervall STT bei $223,86 (\pm 14,62)$ Grad. Am T_{Ende} zeigten sich $239,61 (\pm 14,85)$ Grad.

Die Werte für die Parameter der Koordinaten X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} und der Magnetfeldstärken V_{min} und V_{max} sind der Tab. 5 zu entnehmen. In den Ergebnistabellen (s. Tab. 5-8) handelt es sich bei den Angaben um die Mittelwerte mit der dazugehörigen Standardabweichung. Die signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) sind fett hervorgehoben. Separat sind die drei wichtigsten Parameter IHi, max-min und Winkel in einer MKG-Zeitverlaufskurve (s. Abb. 16-19) und in Box-Plots (s. Abb. 20) dargestellt.

Parameter	Gruppe	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
IHi	Kontrolle n = 11	20,10 $\pm 3,26$	38,77 $\pm 9,13$	14,64 $\pm 3,41$	4,48 $\pm 1,36$
max-min	Kontrolle n = 11	8,61 $\pm 0,89$	16,89 $\pm 2,59$	6,13 $\pm 1,23$	1,87 $\pm 0,50$
Winkel	Kontrolle n = 11	240,35 $\pm 17,41$	288,87 $\pm 15,23$	223,86 $\pm 14,62$	239,61 $\pm 14,85$
Xmin	Kontrolle n = 11	6,34 $\pm 0,62$	7,24 $\pm 0,79$	6,04 $\pm 0,62$	6,46 $\pm 0,77$
Xmax	Kontrolle n = 11	4,10 $\pm 0,46$	3,55 $\pm 0,33$	3,54 $\pm 0,45$	3,28 $\pm 0,34$
Ymin	Kontrolle n = 11	3,91 $\pm 0,47$	4,39 $\pm 0,71$	2,96 $\pm 0,37$	2,97 $\pm 0,52$
Ymax	Kontrolle n = 11	4,43 $\pm 0,51$	3,29 $\pm 0,41$	5,55 $\pm 0,67$	4,82 $\pm 0,54$
Vmin	Kontrolle n = 11	-3,48 $\pm 0,61$	-5,93 $\pm 1,28$	-3,09 $\pm 0,84$	-0,87 $\pm 0,29$
Vmax	Kontrolle n = 11	5,14 $\pm 0,43$	10,96 $\pm 1,52$	3,04 $\pm 0,50$	1,00 $\pm 0,28$

Tab. 5: MKG-Werte der Kontroll-Ratten vor Infarkt für die Parameter des Inhomogenitätsindex (IHi), der Addition der absoluten Werte des Maximums und Minimums der Magnetfeldstärken (max-min in pT), des Winkels (in Grad), der Koordinaten X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} (jeweils in cm), der Magnetfeldstärke V_{min} und V_{max} (jeweils in pT).

Die MKG-Zeitverlaufskurve für die Parameter IHi, max-min und den Winkel der gesunden Ratten ist in Abb. 16 gezeigt. In IHi und max-min zeigte sich ein erster Gipfel im Bereich QRS_{Gesamt} , mit einem Amplitudenmaximum bei 10 ms. Der zweite Kurvenanstieg war flacher und begann nach 20 ms. Seine größte Amplitude lag bei ca. 25 ms. Bei T_{Ende} näherte sich die Kurve der Nulllinie. Der Winkelverlauf zeigte einen Gipfel bei R_{Spitze} und ein Tal bei 15 ms. Nach einem erneuten Anstieg verlief die Kurve ab 20 ms zwischen den beiden ersten Extremata parallel zur Nulllinie.



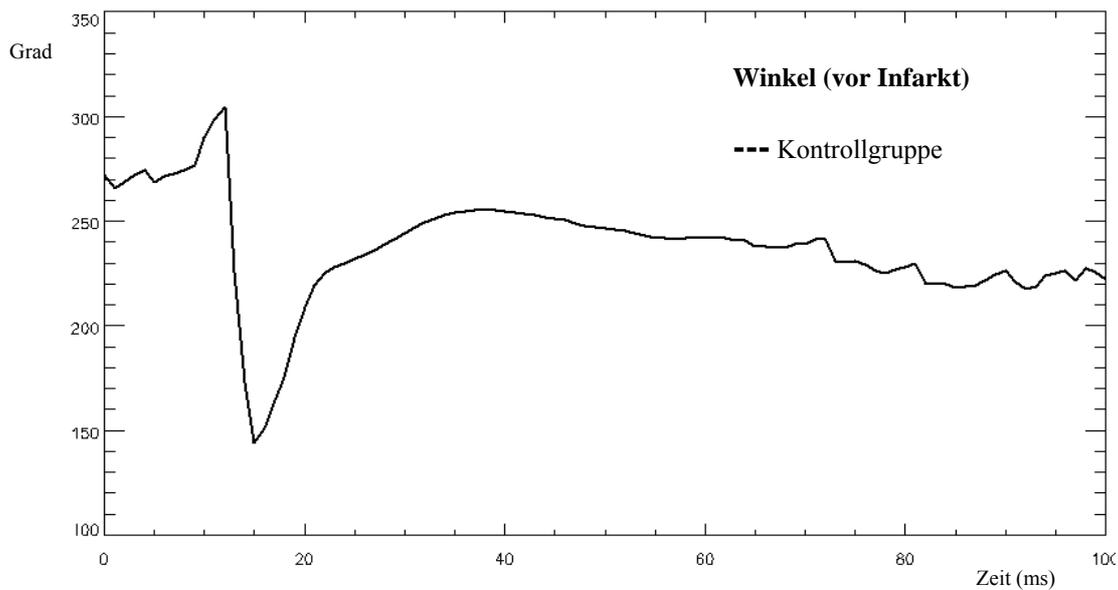


Abb. 16: MKG-Zeitverlaufsmittlungskurve für das Stadium vor dem Infarkt (MKG 0).

3.2.2. Das magnetokardiographische Bild des akuten Myokardinfarktes der Ratte

Unmittelbar nach dem stattgefundenen Myokardinfarkt wurden die Kontrolltiere ($n = 12$) und die Infarkttieren ($n = 26$) magnetokardiographisch untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tab. 6 und die MKG-Zeitverlaufskurve in der Abb. 17 zu sehen.

Der Inhomogenitätsindex I_{Hi} zeigte hochsignifikante Unterschiede ($p < 0,001$) im Bereich des QRS_{Gesamt} mit $21,35 (\pm 5,04)$ bei der Infarktgruppe und $13,09 (\pm 2,51)$ bei der Kontrolle. Diese Signifikanz ergab sich auch bei den Werten in STT mit einer Versechsfachung auf $32,45 (\pm 9,35)$ der Infarkttiere gegenüber den Kontrolltieren ($5,00 \pm 2,04$).

In dem Parameter max-min lag der Wert der Infarktgruppe ($9,80 \pm 2,34$ pT) in QRS_{Gesamt} $^{2/3}$ fach über dem der Kontrolle ($6,03 \pm 1,10$ pT). In STT war max-min der Infarkttiere siebenfach größer ($14,67 \pm 4,12$ pT). Beides zeigte sich als hochsignifikant.

Bei der Winkelbestimmung unterschieden sich die Gruppen nicht signifikant voneinander. Die Koordinate X_{min} reduzierte sich bei der Infarktgruppe in QRS_{Gesamt} signifikant und in R_{Spitze} und STT hochsignifikant. Der Wert von X_{max} verdoppelte sich in STT im Vergleich zur Kontrolle ($p < 0,001$).

In den Zeitintervallen QRS_{Gesamt} und STT zeigten sich hochsignifikante Unterschiede in den Parametern Y_{min} , Y_{max} , V_{min} und V_{max} . In V_{max} reduzierte sich der Wert der Infarkttiere in R_{Spitze} zusätzlich auf $6,52 (\pm 2,01)$ pT.

IHi

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	21,35 ± 5,04	24,13 ± 7,18	32,45 ± 9,35	4,15 ± 1,38
Kontrolle n = 12	13,09 ± 2,51	28,05 ± 7,88	5,00 ± 2,04	4,90 ± 2,62
p-Wert	< 0,001	0,23	< 0,001	0,963

max-min

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	9,80 ± 2,34	11,29 ± 3,43	14,67 ± 4,12	1,77 ± 0,48
Kontrolle n = 12	6,03 ± 1,10	13,11 ± 3,38	2,23 ± 0,92	2,19 ± 1,08
p-Wert	< 0,001	0,185	< 0,001	0,609

Winkel

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	213,16 ± 66,34	252,43 ± 83,28	203,44 ± 160,89	290,83 ± 29,57
Kontrolle n = 12	229,85 ± 23,68	300,32 ± 19,69	255,56 ± 24,19	298,86 ± 17,43
p-Wert	0,609	0,066	0,699	0,545

Xmin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	5,53 ± 0,72	5,96 ± 1,00	4,55 ± 0,76	6,04 ± 0,78
Kontrolle n = 12	6,20 ± 0,60	6,97 ± 0,94	6,49 ± 0,86	6,34 ± 0,76
p-Wert	0,013	0,008	< 0,001	0,312

Xmax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	3,99 ± 0,50	3,61 ± 0,66	4,42 ± 0,43	2,83 ± 0,69
Kontrolle n = 12	3,99 ± 0,44	3,66 ± 0,47	2,87 ± 0,74	2,94 ± 0,63
p-Wert	0,722	0,631	< 0,001	0,631

Ymin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	4,70 ± 0,61	5,03 ± 1,11	6,22 ± 0,37	4,68 ± 1,00
Kontrolle n = 12	3,95 ± 0,78	5,05 ± 1,08	3,53 ± 0,44	5,18 ± 0,77
p-Wert	0,002	0,914	< 0,001	0,137

Ymax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	3,40 ± 0,63	3,16 ± 0,56	2,24 ± 0,64	3,38 ± 0,94
Kontrolle n = 12	4,37 ± 0,55	3,24 ± 0,23	3,73 ± 0,58	3,33 ± 0,39
p-Wert	< 0,001	0,359	< 0,001	0,889

Vmin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	-4,29 ± 1,17	-4,77 ± 1,75	-6,68 ± 2,23	-0,91 ± 0,30
Kontrolle n = 12	-2,33 ± 0,28	-4,30 ± 0,90	-1,13 ± 0,63	-,087 ± 0,29
p-Wert	< 0,001	0,525	< 0,001	0,505

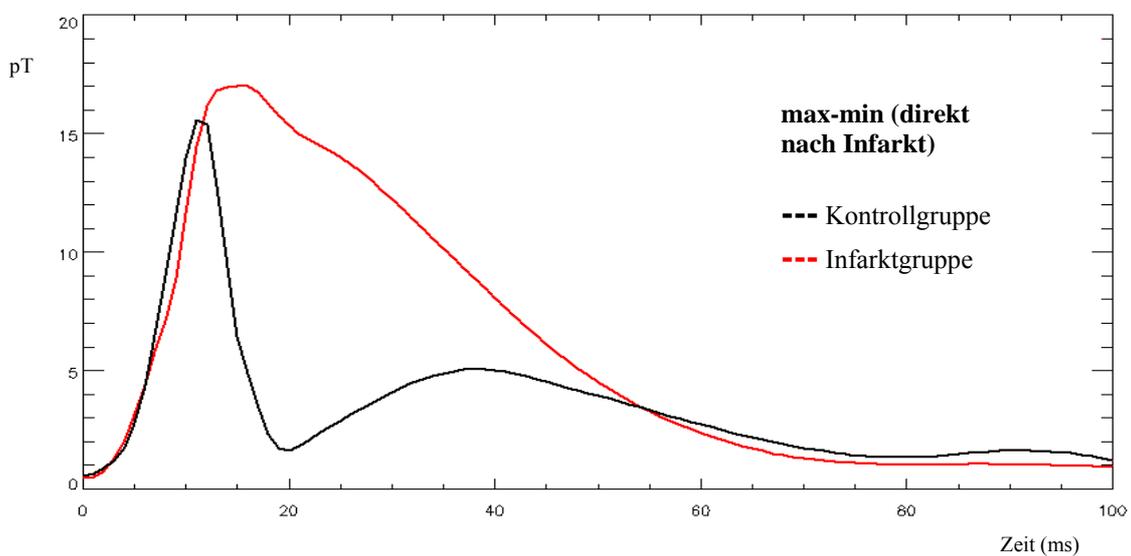
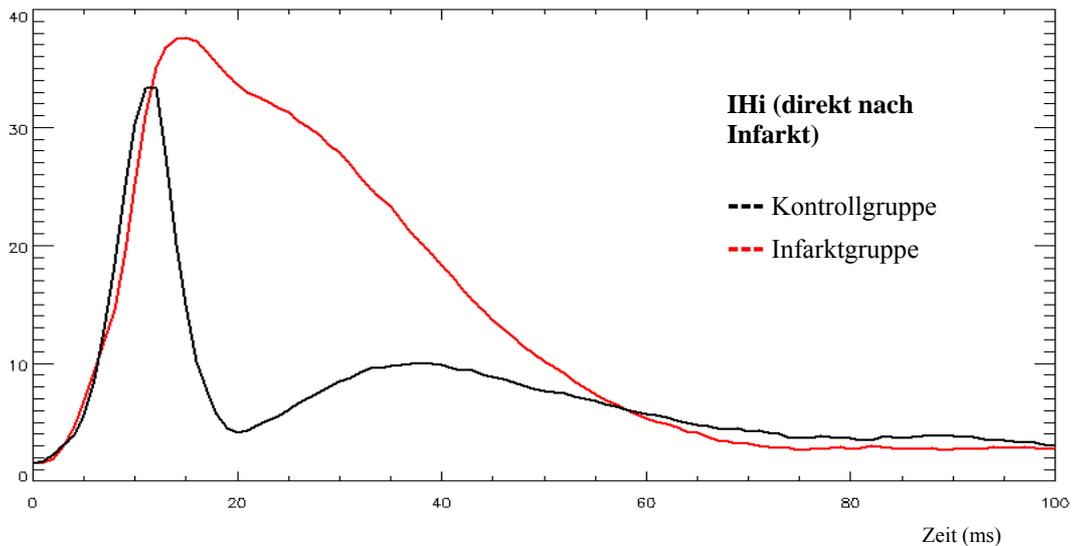
Vmax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (akut) n = 26	5,51 ± 1,36	6,52 ± 2,01	7,99 ± 2,39	0,87 ± 0,34
Kontrolle n = 12	3,70 ± 0,97	8,80 ± 2,67	1,10 ± 0,40	1,32 ± 0,81
p-Wert	< 0,001	0,012	< 0,001	0,155

Tab. 6: MKG-Werte der Kontroll- und der Infarktgruppe direkt nach dem akuten Infarkt für die Parameter des Inhomogenitätsindex (IHi), der Addition der absoluten Werte des Maximums und Minimums der Magnetfeldstärken (max-min in pT), des Winkels (in Grad), der Koordinaten Xmin, Xmax, Ymin, Ymax (jeweils in cm), der Magnetfeldstärke Vmin und Vmax (jeweils in pT). Mann-Whitney-U-Test.

In der magnetokardiographischen Zeitverlaufskurve zeigte sich beim IHi im akuten Myokardinfarktstadium eine hochsignifikante Hebung der Infarktgruppenkurve gegenüber der

Kontrollgruppe zum Ende des QRS_{Gesamt} bis STT. Diese Hebung war bei T_{Ende} rückläufig und die Kurven glichen sich an. Die Verlaufskurve für max-min zeigte die gleiche Änderung wie beim IHi. Der Winkel bei den Infarkttieren lag zu Beginn höher als bei den Kontrolltieren. Ihr Gipfel verlief unter der SD-Verlaufskurve, zusätzlich hatten die Infarkttiere eine geringere Kurvenamplitude. Nach 30 ms stieg die Infarktwinkelkurve über die Kontrollkurve an (s. Abb. 17).



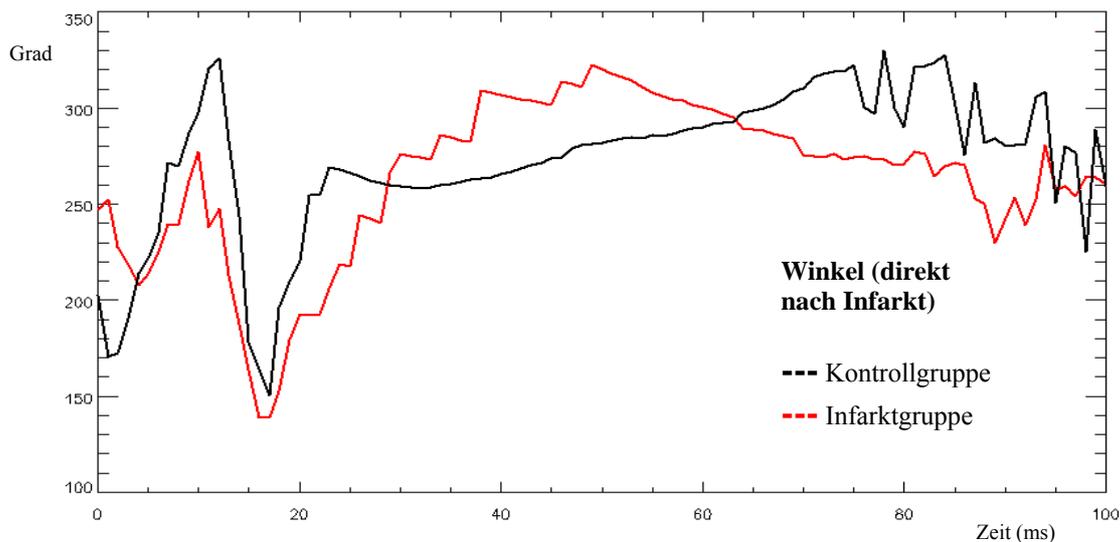


Abb. 17: MKG-Zeitverlaufsmittlungskurve direkt nach dem Infarkt (MKG I).

3.2.3. Die magnetokardiographische Verlaufsentwicklung des Rattenherzens vom „akuten“ zum „chronischen“ Infarktstadium

Zwei Wochen nach dem stattgefundenen Myokardinfarkt zeigten sich in der Magnetokardiographie der Ratten (Kontrolltiere (n = 13); Infarkttiere (n = 11)) die in der Tab. 7 und in der Abb. 18 gezeigten Veränderungen.

Der Inhomogenitätsindex IHi der Infarkttiere ($16,94 \pm 3,62$) nahm gegenüber der Kontrollgruppe ($4,88 \pm 1,94$) bei T_{Ende} hochsignifikant ($p < 0,001$) um das Vierfache zu. Der Wert für max-min verdreifachte sich infarktbedingt hochsignifikant in T_{Ende} auf $7,34 (\pm 1,65)$ pT. Zum Zeitpunkt von R_{Spitze} zeigte er einen hochsignifikanten Unterschied beider Gruppen mit einer Reduktion des Wertes nach stattgefundenem Infarkt. Der Winkel unterschied sich während QRS_{Gesamt} , R_{Spitze} und T_{Ende} hochsignifikant. Für die Infarkttiere lag der Werte zu diesen Intervallen niedriger als bei den Kontrollen.

Die Koordinate Xmin zeigte zu allen Zeitintervallen eine hochsignifikante Reduktion des infarktbedingten Wertes. Xmax der Infarktgruppe erhöhte sich in R_{Spitze} und T_{Ende} stark auf $4,51 (\pm 0,86)$ cm und $4,01 (\pm 0,30)$ cm (Kontrolle: $3,72 \pm 0,30$ cm; $3,37 \pm 0,41$ cm). Ymin zeigte eine hochsignifikante Trennung der Gruppen in R_{Spitze} , STT und T_{Ende} . Ymax war bei den Infarkttieren zu jedem Zeitintervall deutlich erhöht. Die Magnetfeldstärke Vmin reduzierte sich infarktbedingt in T_{Ende} auf einen $\frac{1}{3}$ niedrigeren Wert ($-3,44 \pm 0,78$ pT) gegenüber der

Kontrollgruppe ($-1,06 \pm 0,39$ pT). Hochsignifikante Unterschiede zeigten sich in V_{\max} bei R_{Spitze} , QRS_{Gesamt} und T_{Ende} .

IHi

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	17,76 $\pm 6,28$	29,14 $\pm 8,16$	11,41 $\pm 4,59$	16,94 $\pm 3,62$
Kontrolle n = 13	17,35 $\pm 3,53$	33,05 $\pm 8,68$	11,76 $\pm 2,91$	4,88 $\pm 1,94$
p-Wert	0,820	0,252	0,691	< 0,001

max-min

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	7,45 $\pm 2,64$	12,59 $\pm 3,57$	4,79 $\pm 1,87$	7,34 $\pm 1,65$
Kontrolle n = 13	8,29 $\pm 1,47$	16,48 $\pm 3,28$	5,64 $\pm 1,14$	2,35 $\pm 0,77$
p-Wert	0,277	0,004	0,207	< 0,001

Winkel

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	177,25 $\pm 32,93$	181,37 $\pm 34,94$	198,03 $\pm 32,39$	198,58 $\pm 8,20$
Kontrolle n = 13	235,20 $\pm 30,82$	285,83 $\pm 17,27$	216,41 $\pm 16,65$	244,97 $\pm 9,11$
p-Wert	< 0,001	< 0,001	0,150	< 0,001

Xmin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	5,06 $\pm 0,53$	5,04 $\pm 0,59$	5,17 $\pm 0,57$	5,32 $\pm 0,36$
Kontrolle n = 13	6,64 $\pm 0,54$	7,68 $\pm 0,85$	6,04 $\pm 0,70$	7,00 $\pm 0,70$
p-Wert	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001

Xmax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	4,45 ± 0,71	4,51 ± 0,86	3,85 ± 0,82	4,01 ± 0,30
Kontrolle n = 13	4,12 ± 0,43	3,72 ± 0,30	3,75 ± 0,52	3,37 ± 0,41
p-Wert	0,063	0,002	0,569	0,001

Ymin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	3,67 ± 0,61	2,07 ± 0,89	3,16 ± 1,11	1,81 ± 0,50
Kontrolle n = 13	3,31 ± 0,66	3,67 ± 0,76	2,12 ± 0,63	2,43 ± 0,48
p-Wert	0,119	< 0,001	0,013	0,009

Ymax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	4,57 ± 0,75	5,36 ± 0,64	5,52 ± 1,12	5,77 ± 0,29
Kontrolle n = 13	3,79 ± 0,37	2,73 ± 0,49	5,30 ± 0,54	4,11 ± 0,48
p-Wert	0,006	< 0,001	0,015	< 0,001

Vmin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	-3,69 ± 1,34	-6,64 ± 2,31	-2,54 ± 1,18	-3,44 ± 0,78
Kontrolle n = 13	-3,34 ± 0,80	-6,01 ± 1,32	-3,01 ± 0,57	-1,06 ± 0,39
p-Wert	0,494	0,531	0,167	< 0,001

Vmax

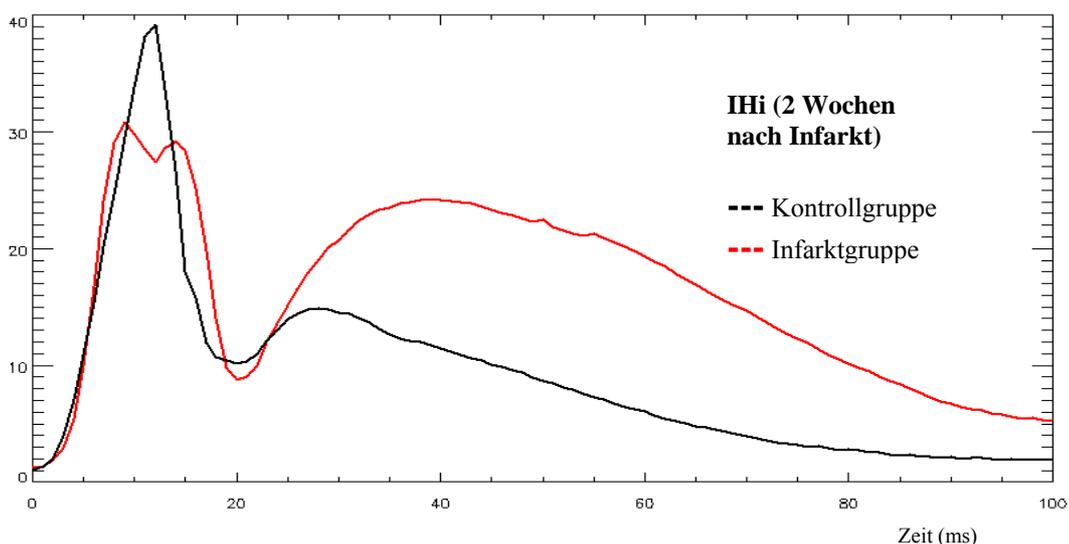
	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	3,76 ± 1,41	5,95 ± 1,85	2,25 ± 0,95	3,91 ± 1,07
Kontrolle n = 13	4,95 ± 0,76	10,47 ± 2,12	2,63 ± 0,64	1,29 ± 0,45
p-Wert	0,030	< 0,001	0,207	< 0,001

Tab. 7: MKG-Werte der Kontroll- und der Infarktgruppe 2 Wochen nach Infarkt für die Parameter des Inhomogenitätsindex (IHi), der Addition der absoluten Werte des Maximums und Minimums der Magnetfeldstärken (max-min in pT), des Winkels (in Grad), der Koordinaten Xmin, Xmax, Ymin, Ymax (jeweils in cm), der Magnetfeldstärke Vmin und Vmax (jeweils in pT). Mann-Whitney-U-Test.

Zwei Wochen nach Infarkt ereignis zeigte die MKG-Zeitverlaufskurve des IHi eine Abnahme der Amplitude im Intervall von QRS_{Gesamt} bei den Infarkttieren (s. Abb. 18). Gleichzeitig entwickelte sich eine Zweigipfligkeit. Der im STT-Intervall stattgefundenene erneute Kurvenanstieg lag signifikant über der SD-Gruppe. Die Kurve erreichte später die Nulllinie.

Der SD-Kurvenverlauf zeigte eine geringe Erhöhung der Spitze im QRS_{Gesamt} im Vergleich zu zwei Wochen vorher. Die Verlaufskurve für max-min wies die gleiche Änderung wie beim IHi auf. Die Winkelveränderung der Infarkttiere zeigte Parallelitäten zur vorherigen Messung. Dem beginnenden positiveren Werten im Vergleich zu den SD-Tieren folgten Werte, die unter der SD-Verlaufskurve lagen.

Die SD-Tiere zeigten eine geringe Abnahme der Amplitude in QRS_{Gesamt} bei Gegenüberstellung zu 2 Wochen vorher. Sie verliefen zu den anderen Zeiten ähnlich (s. Abb. 18).



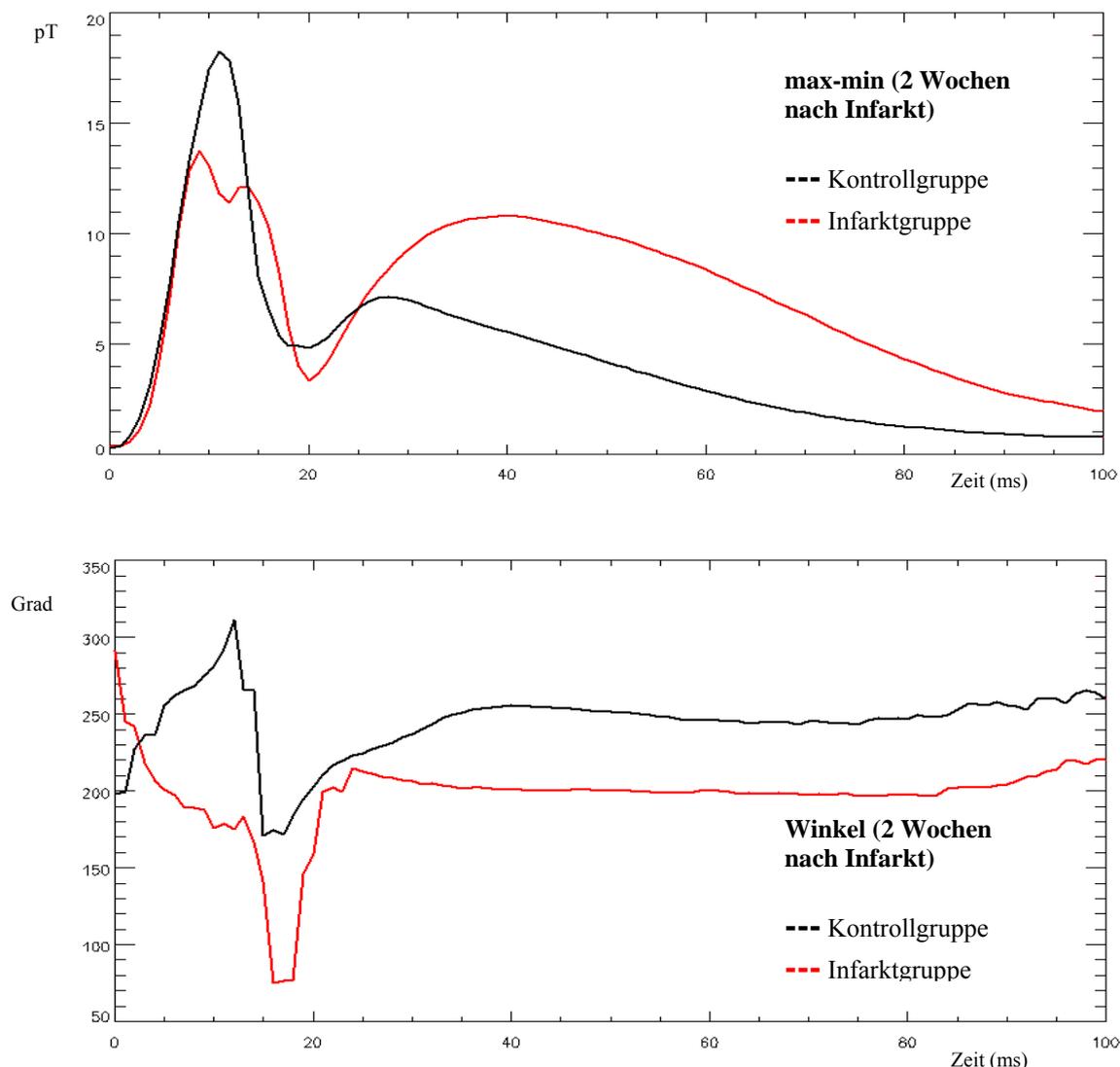


Abb. 18: MKG-Zeitverlaufsmittlungskurve für das chronische Infarktstadium (2 Wochen nach Infarkt (MKG II)).

Die Ergebnisse der magnetokardiographischen Untersuchung in der 4. Woche nach akutem Myokardinfarkt sind in der Tab. 8 und in Abb. 19 dargestellt.

Zum Zeitpunkt R_{Spitze} zeigte der IHi der Infarktgruppe ($n = 11$) eine signifikante Reduktion auf $27,62 (\pm 12,35)$ gegenüber der Kontrolle ($39,42 \pm 8,79$; $n = 13$). Während STT reduzierte sich der IHi der Infarkttiere hochsignifikant. Eine Verdreifachung des IHi von $5,50 (\pm 1,55)$ auf $15,29 (\pm 3,94)$ zeigte sich infarktbedingt in T_{Ende} mit $p < 0,001$.

Der Parameter max-min unterschied sich hochsignifikant zwischen den Gruppen in den Intervallen R_{Spitze} , STT und T_{Ende} . Eine signifikante Trennung ergab sich in QRS_{Gesamt} .

In der Winkelveränderung zeigte sich eine hochsignifikante Reduktion der Infarktwerte während der Messzeiträume QRS_{Gesamt} , R_{Spitze} und T_{Ende} .

Die Koordinate Xmin reduzierte sich deutlich infarktbedingt in allen Zeitintervallen. Xmax erhöhte sich in T_{Ende} mit p = 0,030. Ymin zeigte eine signifikante Wertzunahme bei den Infarkttieren in QRS_{Gesamt} und STT. Er nahm zum Zeitintervall T_{Ende} auf 1,57 (± 0,49) cm ab. Ymax verdoppelte sich hochsignifikant in der Infarktgruppe während R_{Spitze} und zeigte eine deutliche Zunahme in T_{Ende}.

Die Magnetfeldstärke Vmin wies eine signifikante infarktverursachte Abnahme in R_{Spitze} und eine hochsignifikante Abnahme in STT und Zunahme in T_{Ende} auf. Vmax unterschied sich in den Gruppen zu allen Zeitpunkten hochsignifikant.

IHi

	QRS _{Gesamt}	R _{Spitze}	STT	T _{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	18,94 ± 8,62	27,62 ± 12,35	9,00 ± 4,77	15,29 ± 3,94
Kontrolle n = 13	22,16 ± 2,75	39,42 ± 8,79	16,14 ± 3,18	5,50 ± 1,55
p-Wert	0,119	0,005	0,001	< 0,001

max-min

	QRS _{Gesamt}	R _{Spitze}	STT	T _{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	8,03 ± 3,69	11,49 ± 5,12	3,66 ± 1,87	6,95 ± 1,62
Kontrolle n = 13	11,03 ± 1,53	21,00 ± 4,40	7,58 ± 1,24	2,76 ± 0,87
p-Wert	0,026	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Winkel

	QRS _{Gesamt}	R _{Spitze}	STT	T _{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	158,74 ± 49,72	167,59 ± 48,88	193,89 ± 50,98	197,71 ± 8,22
Kontrolle n = 13	234,33 ± 28,51	273,81 ± 22,45	201,93 ± 7,98	236,06 ± 14,61
p-Wert	0,001	< 0,001	0,361	< 0,001

Xmin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	4,83 ± 0,45	4,87 ± 0,70	4,82 ± 0,54	5,20 ± 0,43
Kontrolle n = 13	6,88 ± 0,68	8,03 ± 0,73	5,78 ± 0,56	6,92 ± 0,96
p-Wert	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Xmax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	4,48 ± 0,66	4,57 ± 1,09	3,93 ± 0,92	3,92 ± 0,37
Kontrolle n = 13	4,36 ± 0,52	4,03 ± 0,46	4,29 ± 0,46	3,61 ± 0,30
p-Wert	0,691	0,277	0,424	0,030

Ymin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	3,62 ± 0,56	2,32 ± 1,28	3,60 ± 0,93	1,57 ± 0,49
Kontrolle n = 13	3,06 ± 0,58	3,29 ± 0,74	1,64 ± 0,54	2,16 ± 0,66
p-Wert	0,035	0,082	< 0,001	0,035

Ymax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	3,89 ± 0,51	4,61 ± 0,66	5,34 ± 1,16	5,65 ± 0,27
Kontrolle n = 13	3,52 ± 0,23	2,71 ± 0,46	5,46 ± 0,31	4,35 ± 0,48
p-Wert	0,055	< 0,001	0,776	< 0,001

Vmin

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	-4,10 ± 1,96	-5,96 ± 2,70	-2,07 ± 0,83	-3,39 ± 0,67
Kontrolle n = 13	-4,62 ± 0,82	-8,07 ± 1,50	-4,10 ± 0,66	-1,34 ± 0,42
p-Wert	0,252	0,030	< 0,001	< 0,001

Vmax

	QRS_{Gesamt}	R_{Spitze}	STT	T_{Ende}
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	3,93 ± 1,83	5,52 ± 2,62	1,59 ± 1,19	3,56 ± 1,04
Kontrolle n = 13	6,41 ± 1,05	12,93 ± 3,17	3,48 ± 0,67	1,42 ± 0,47
p-Wert	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Tab. 8: MKG-Werte der Kontroll- und der Infarktgruppe 4 Wochen nach Infarkt für die Parameter des Inhomogenitätsindex (IHi), der Addition der absoluten Werte des Maximums und Minimums der Magnetfeldstärken (max-min in pT), des Winkels (in Grad), der Koordinaten Xmin, Xmax, Ymin, Ymax (jeweils in cm), der Magnetfeldstärke Vmin und Vmax (jeweils in pT). Mann-Whitney-U-Test.

Nach vier Wochen zeigte die MKG-Zeitverlaufskurve für IHi, max-min und für den Winkel (Abb. 19) eine Fortsetzung des zwei Wochen vorher gesehenen Bildes. Die Amplitude für IHi und max-min im QRS_{Gesamt} nahm im Vergleich zu den SD-Tieren ab, die Zweigipfligkeit blieb bestehen. Der zweite Anstieg der Kurve nach 20 ms zeigte einen verlängerten Anstieg für IHi und max-min und eine spätere Nulllinienannäherung. Die Amplitude dieser Kurve wies eine geringe Zunahme zur SD-Verlaufskurve auf.

Die Kurve der SD-Tiere zeigte im Vergleich zu 2 Wochen vorher eine Zunahme der Amplitude im QRS_{Gesamt} für die Parameter max-min und IHi.

Die Winkelveränderung fand bei den Infarkttieren eine stärkere Abnahme im QRS_{Gesamt} im Vergleich zu den SD-Tieren und verlief zu den anderen Zeiten parallel zu der zwei Wochen vorher registrierten Messung.

Die Winkelverlaufskurve der SD-Tiere nahm im Vergleich zu der SD-Gruppe zwei Wochen vorher im QRS_{Gesamt} an Amplitude ab. Im STT-Intervall zeigten sich keine Veränderungen.

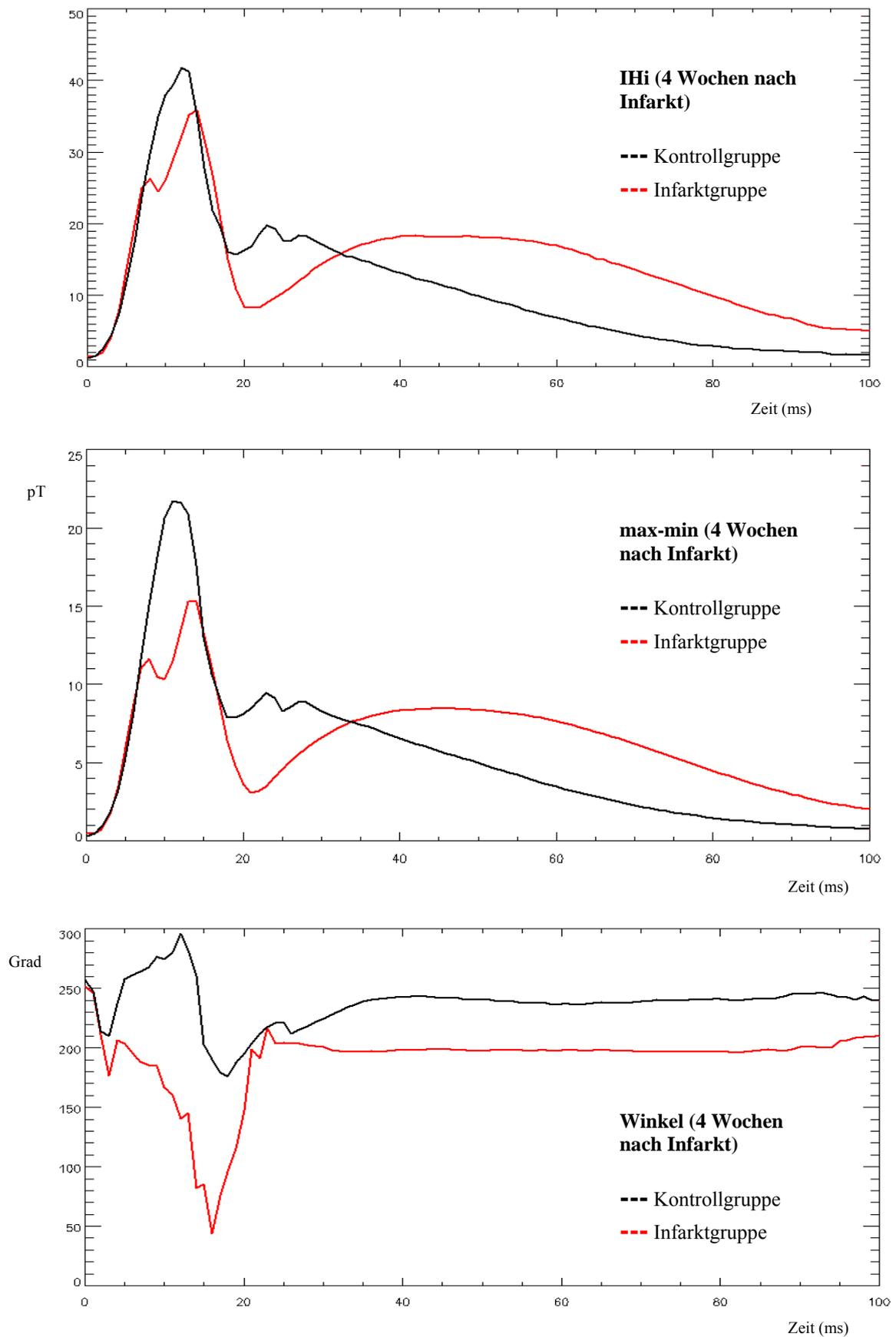


Abb. 19: MKG-Zeitverlaufsmittlungskurve für das chronische Infarktstadium (4 Wochen nach Infarkt (MKG III)).

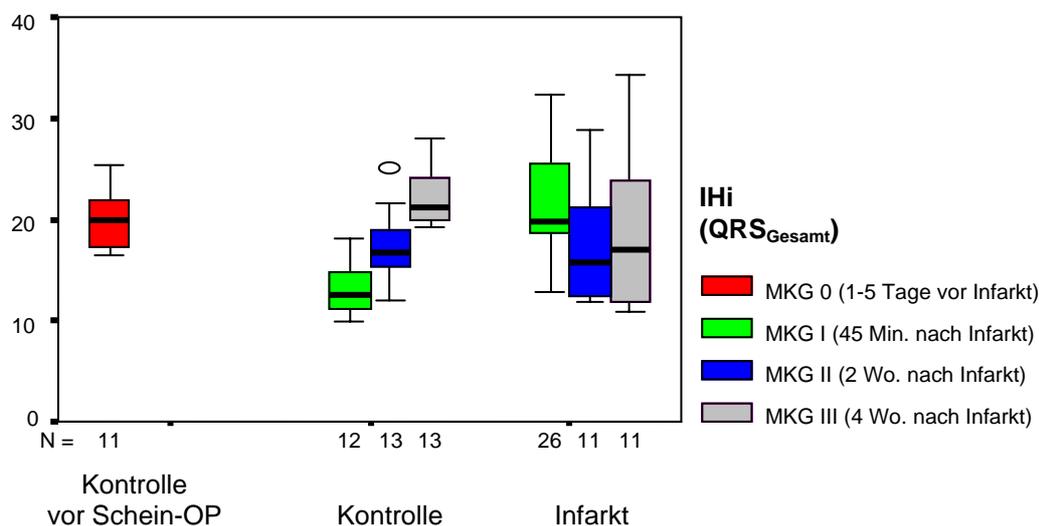
3.2.4. Zeitverlauf der magnetokardiographischen Veränderungen

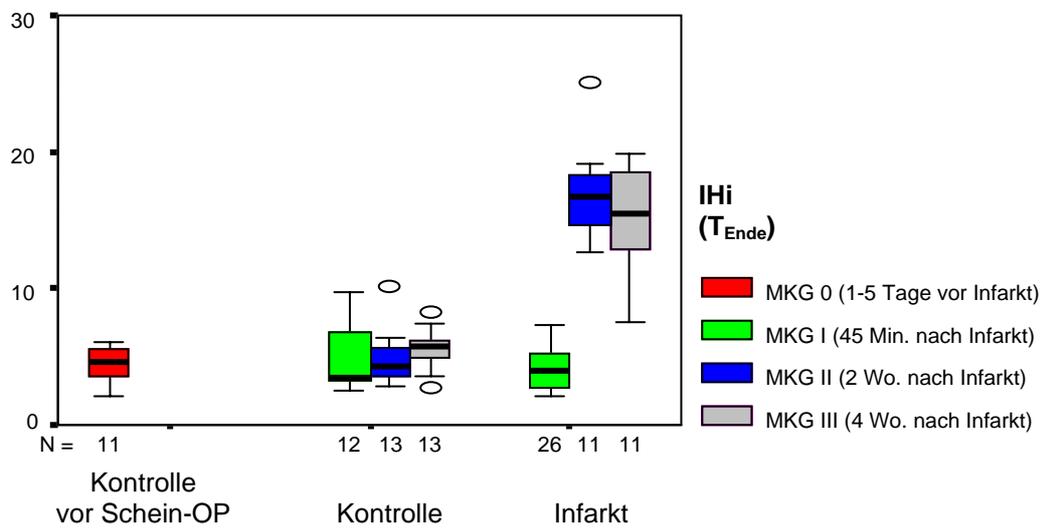
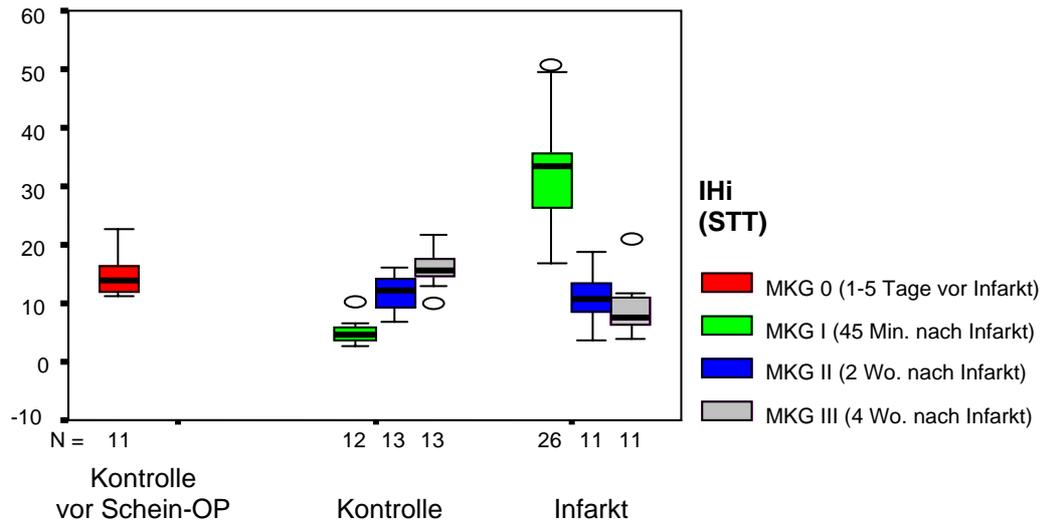
Die Darstellung der drei wichtigsten magnetokardiographischen Parameter IHi, max-min und der Winkel in den Zeitintervallen QRS_{Gesamt} , R_{Spitze} , STT und T_{Ende} erfolgte gesondert in Box-Plots (Abb. 20). Vergleichend wurden die Kontroll- und die Infarktgruppe über den gesamten zeitlichen Verlauf zur Verdeutlichung der MKG-Zeitverlaufskurven und –Tabellen (s. Kapitel 3.2.1. – 3.2.3.) gegenübergestellt.

Besonders hoben sich in den Parametern IHi und max-min im Intervall QRS_{Gesamt} und STT hochsignifikante Unterschiede in der Akutphase des Infarktes zwischen den Infarkt- und Kontrolltieren hervor. Die Infarktgruppe zeigte höhere Werte als die Kontrollgruppe. Zum Zeitpunkt T_{Ende} erhöhten sich in der zweiten und vierten Woche die Werte für IHi und max-min der Infarktgruppe hochsignifikant gegenüber der Kontrolle.

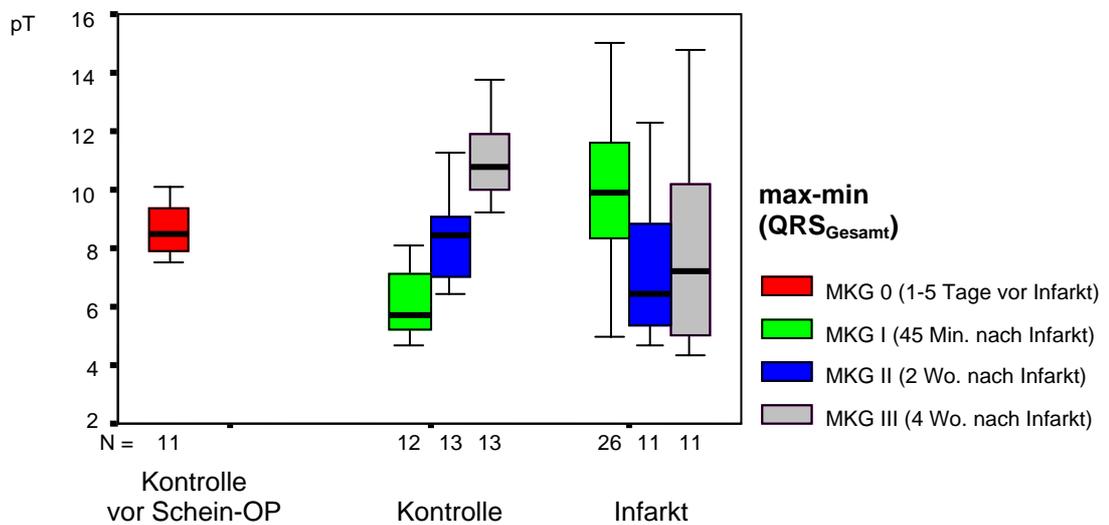
Der Winkel zeigte eine kontinuierliche Abnahme bei den Infarkttieren vom akuten bis zum chronischen Stadium in QRS_{Gesamt} , R_{Spitze} und T_{Ende} im Gegensatz zur Kontrollgruppe, die über die Zeit konstante Werte aufwies.

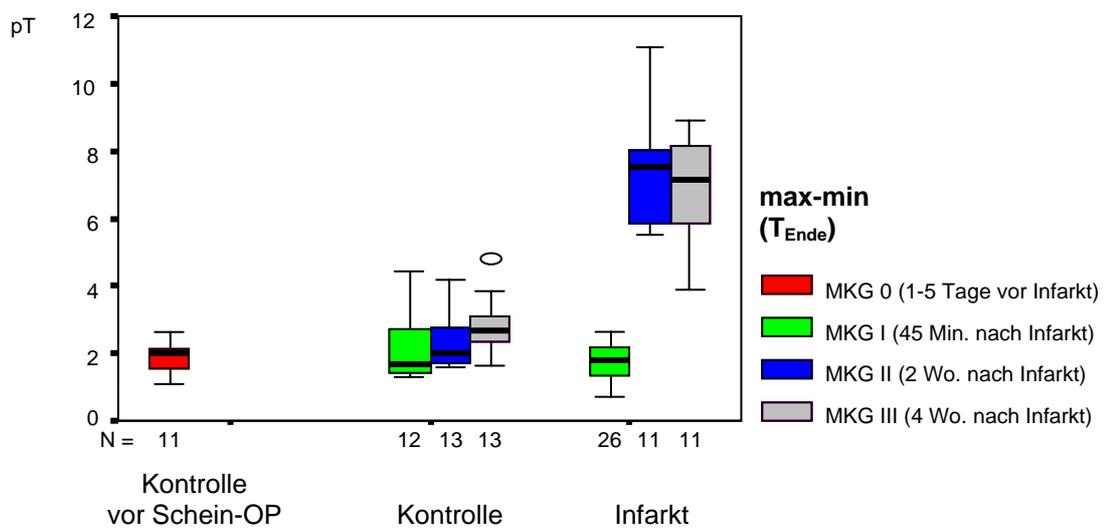
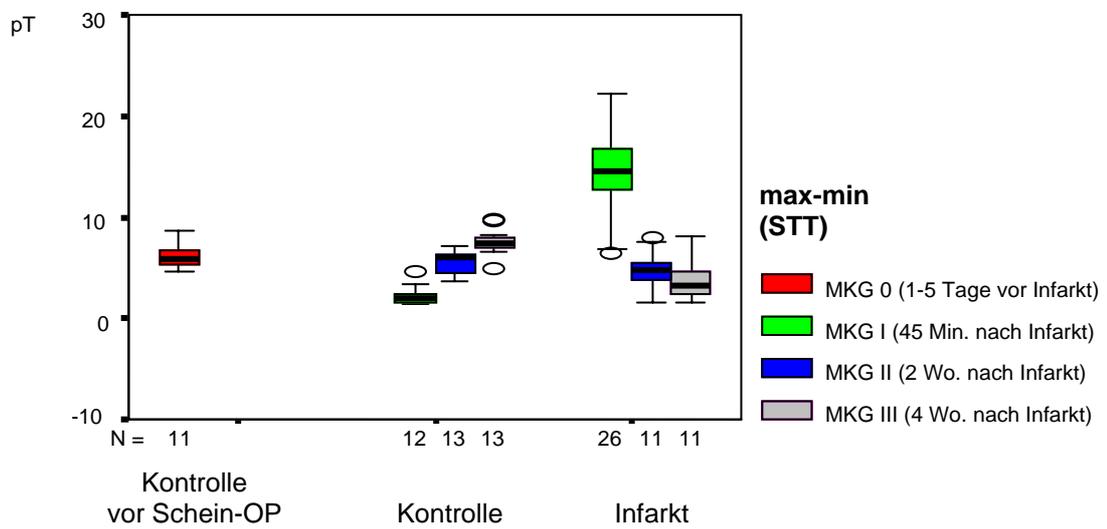
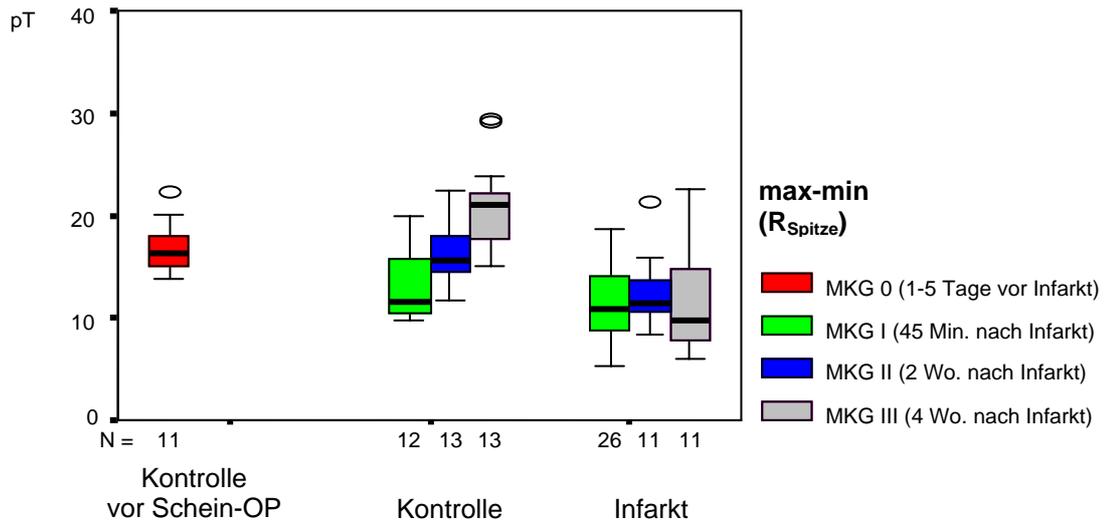
Parameter IHi



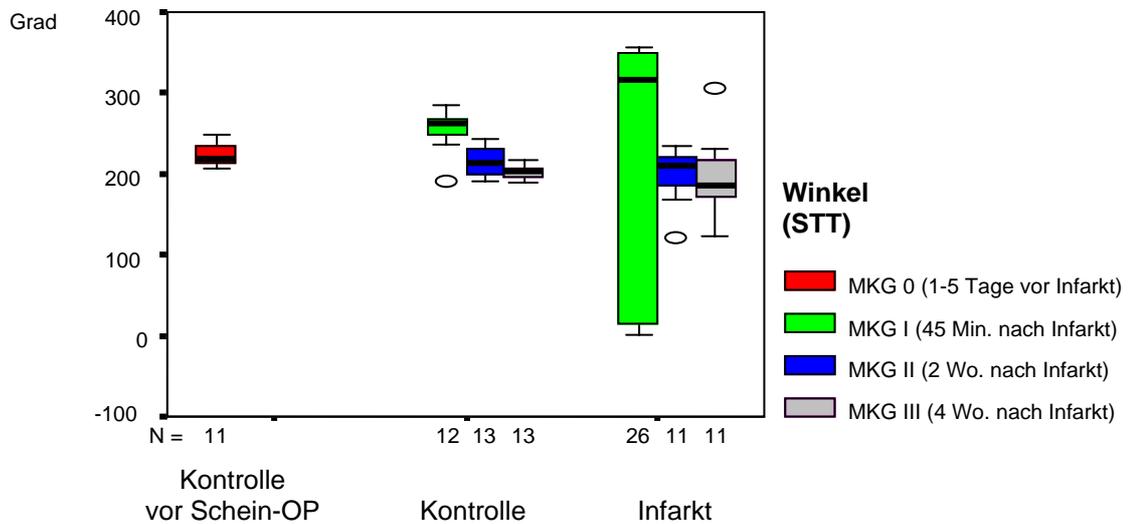
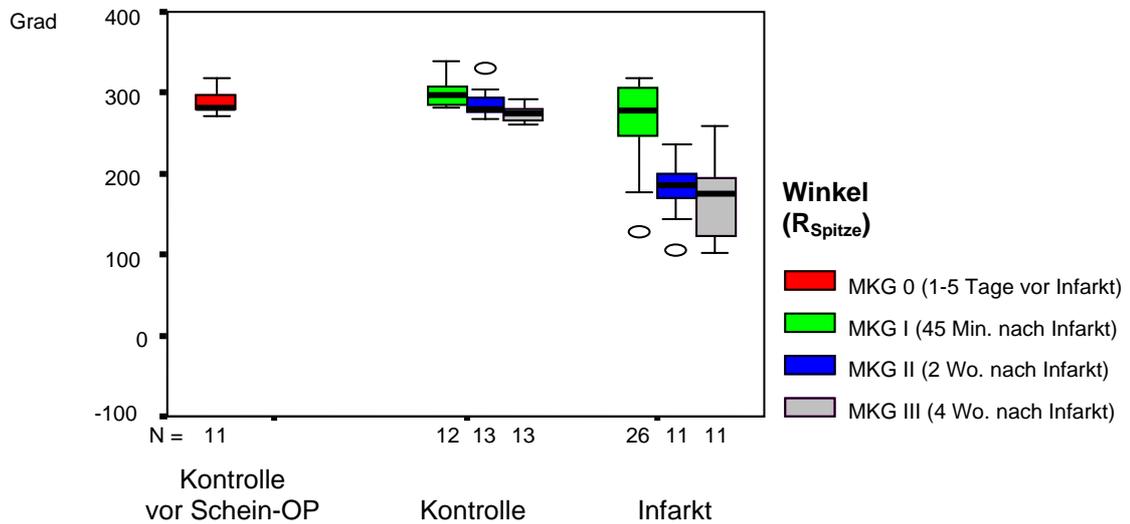
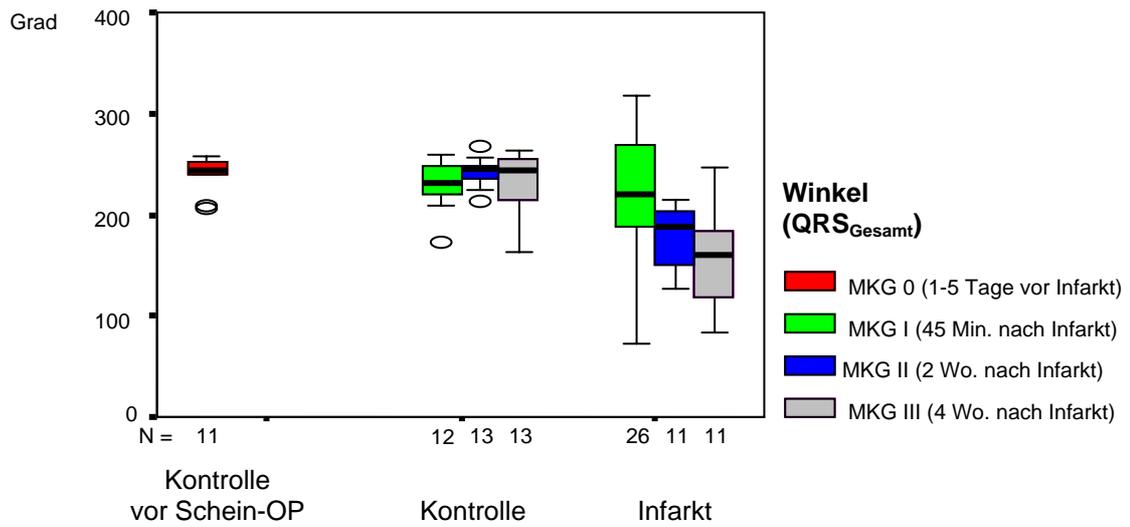


Parameter max-min





Parameter Winkel



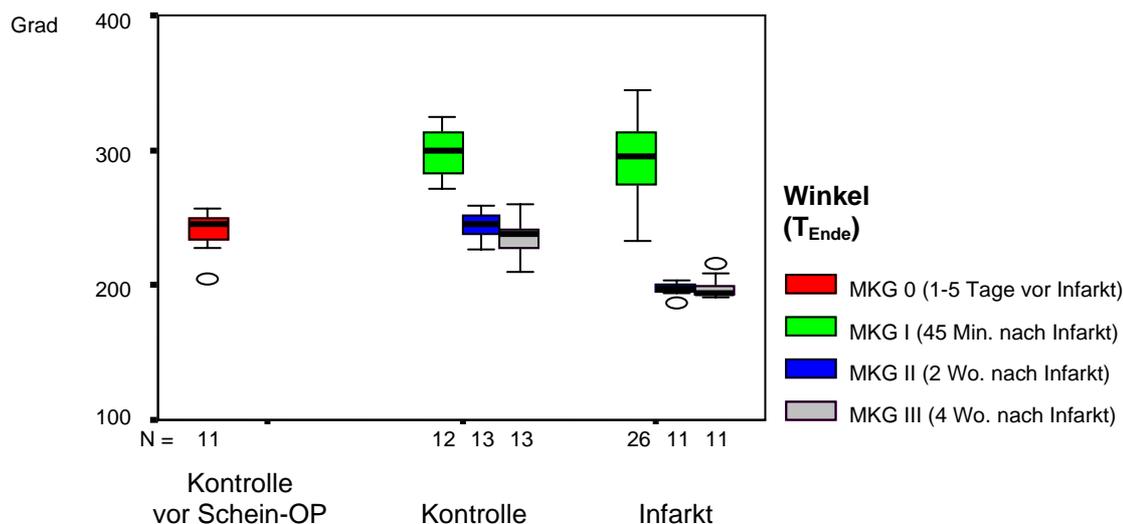


Abb. 20: Darstellung des magnetokardiographischen Zeitverlaufs in Box-Plots für die Kontroll- und Infarktgruppe für die Parameter IHi (relative Einheit), max-min (in pT) und für den Winkels (in Grad) in den Zeitintervallen QRS_{Gesamt}, R_{Spitze}, STT und T_{Ende}.

3.3. Elektrokardiographischer Verlauf

In der elektrokardiographischen Untersuchung vor therapeutischer Intervention konnte an 11 Ratten das Ausgangs-EKG-Bild gezeigt werden. Die Ergebnisse sind in der Tab. 9 dargestellt. Die Herzfrequenz befand sich bei $307,82 (\pm 22,92) \text{ min}^{-1}$, die P-Wellen-Amplitude bei $0,14 (\pm 0,04) \text{ mV}$ und das PQ-Intervall bei $48,44 (\pm 3,53) \text{ ms}$. Die QT-Dauer betrug $64,38 (\pm 5,78) \text{ ms}$, die QRS-Dauer $16,67 (\pm 2,05) \text{ ms}$ und der QRS-Amplituden-Index lag bei $1,89 (\pm 0,32) \text{ mV}$. Eine ST-Streckenhebung und eine Q-Zacke waren nicht vorhanden.

Parameter	Herz- frequenz (min^{-1})	P-Wellen- Amplitude (mV)	PQ- Intervall (ms)	QT- Dauer (ms)	QRS- Dauer (ms)	QRS- Amplituden- Index (mV)	ST-Hebung ($> 0.1 \text{ mV}$)	Q- Zacke
Kontrolle n = 11	307,82 $\pm 22,92$	0,14 $\pm 0,04$	48,44 $\pm 3,53$	64,38 $\pm 5,78$	16,67 $\pm 2,05$	1,89 $\pm 0,32$	keine	keine

Tab. 9: EKG der Kontroll-Ratten vor Infarkt. Mittelwerte der Parameter Herzfrequenz, P-Wellen-Amplitude, PQ-Intervall, QT-Dauer, QRS-Dauer, QRS-Amplituden-Index, Angabe der ST-Hebung und Q-Zacke.

Die elektrokardiographischen Untersuchungsergebnisse von 14 Kontrolltieren und 23 Infarkttieren im akuten Infarktstadium stehen in der Tab. 10. Hochsignifikante Unterschiede zeigten sich in dem PQ-Intervall ($p = 0,006$). Diese Zeit war bei den Kontrolltieren um 10 ms verlängert. Alle 23 Infarkttiere zeigten eine ST-Hebung. Die Kontrolltiere hatten keine ST-Hebung. Eine Q-Zackenausbildung zeigten 11 Infarkttiere.

Parameter	Herz- frequenz (min^{-1})	P-Wellen- Amplitude (mV)	PQ- Intervall (ms)	QT- Dauer (ms)	QRS- Dauer (ms)	QRS- Amplituden- Index (mV)	ST-Hebung (> 0.1 mV)	Q- Zacke
Infarkt (akut) n = 23	414,30 $\pm 37,05$	0,15 $\pm 0,04$	57,56 $\pm 7,68$	71,13 $\pm 14,08$	18,25 $\pm 3,81$	1,79 $\pm 0,37$	bei allen Tieren:	bei 12 Tieren
Kontrolle n = 14	407,23 $\pm 41,68$	0,17 $\pm 0,02$	67,96 $\pm 12,41$	73,09 $\pm 6,61$	18,59 $\pm 2,26$	1,94 $\pm 0,34$	keine	keine
p-Wert	0,791	0,075	0,006	0,535	0,276	0,314	-----	-----

Tab. 10: EKG der Infarkt- und der Kontrolltiere direkt nach akutem Infarkt. Mittelwerte der Parameter Herzfrequenz, P-Wellen-Amplitude, PQ-Intervall, QT-Dauer, QRS-Dauer, QRS-Amplituden-Index, Angabe der ST-Hebung und Q-Zacke. Mann-Whitney-U-Test.

In der Elektrokardiographie ergaben sich zwei Wochen nach dem Infarkt signifikante Unterschiede zwischen den Kontrolltieren ($n = 13$) und den Infarkttieren ($n = 11$) im PQ-Intervall, der QRS-Dauer und der Q-Zackenausbildung. Die Ergebnisse stehen in der Tab. 11. Das PQ-Intervall zeigte sich bei den Infarkttieren signifikant verlängert und die QRS-Dauer verkürzt. Eine Q-Zacke wiesen alle Infarkttiere auf, die Kontrollgruppe besaßen keine.

Parameter	Herz- frequenz (min ⁻¹)	P-Wellen- Amplitude (mV)	PQ- Intervall (ms)	QT- Dauer (ms)	QRS- Dauer (ms)	QRS- Amplituden- Index (mV)	ST-Hebung (> 0.1 mV)	Q- Zacke
Infarkt (nach 2 Wochen) n = 11	305,00 ± 43,07	0,16 ± 0,09	56,25 ± 5,16	69,64 ± 18,4	16,31 ± 3,19	2,11 ± 0,58	keine	bei allen Tieren
Kontrolle n = 13	294,31 ± 47,22	0,13 ± 0,05	51,53 ± 1,10	71,12 ± 10,61	19,62 ± 3,28	1,75 ± 0,19	keine	keine
p-Wert	0,392	0,069	0,013	0,695	0,037	0,260	-----	-----

Tab. 11: EKG der Infarkt- und der Kontrolltiere 2 Wochen nach Infarkt. Mittelwerte der Parameter Herzfrequenz, P-Wellen-Amplitude, PQ-Intervall, QT-Dauer, QRS-Dauer und QRS-Amplituden-Index, Angabe der ST-Hebung und Q-Zacke. Mann-Whitney-U-Test.

Nach einem Zeitraum von 4 Wochen nach stattgefundenem Myokardinfarkt war die Herzfrequenz der Infarkttiere im EKG mit 324,27 (± 28,48) min⁻¹ hochsignifikant gegenüber der Kontrolle (291,61 ± 43,45 min⁻¹) erhöht (p = 0,004). Die P-Wellen-Amplitude zeigte sich signifikant größer als bei den Kontrolltieren (p = 0,003). Eine Q-Zacke wiesen alle Infarkttiere auf. Die Ergebnisse stehen in der Tab. 12.

Parameter	Herz- frequenz (min ⁻¹)	P-Wellen- Amplitude (mV)	PQ- Intervall (ms)	QT- Dauer (ms)	QRS- Dauer (ms)	QRS- Amplituden- Index (mV)	ST-Hebung (> 0.1 mV)	Q- Zacke
Infarkt (nach 4 Wochen) n = 11	324,27 ± 28,48	0,16 ± 0,04	55,47 ± 4,13	64,89 ± 13,93	18,44 ± 6,74	1,93 ± 0,65	keine	bei allen Tieren
Kontrolle n = 13	291,62 ± 43,45	0,11 ± 0,08	59,17 ± 15,22	65,92 ± 9,75	19,68 ± 2,62	1,60 ± 0,33	keine	keine
p-Wert	0,004	0,003	0,252	0,649	0,207	0,303	-----	-----

Tab. 12: EKG der Infarkt- und der Kontrolltiere 4 Wochen nach Infarkt. Mittelwerte der Parameter Herzfrequenz, P-Wellen-Amplitude, PQ-Intervall, QT-Dauer, QRS-Dauer und QRS-Amplituden-Index, Angabe der ST-Hebung und Q-Zacke. Mann-Whitney-U-Test.