

## IV Ergebnisse

### 4.0 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

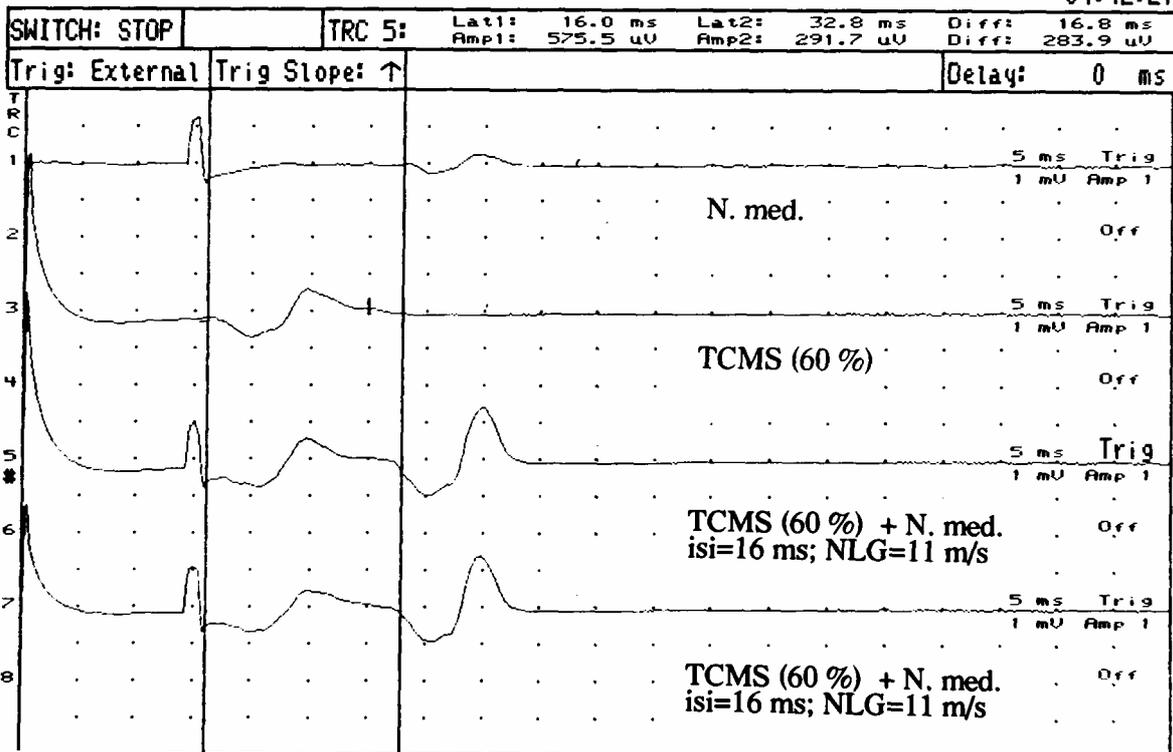
- Eindeutige Bahnung des H-Reflexes durch TCMS.
- Bei proximalen Extremitätenmuskeln Bahnung des H-Reflexes durch TCMS bei negativen und kurzen Zeitintervallen und keine Bahnung, bzw. nur Hemmung des H-Reflexes durch TCMS bei langen positiven Zeitintervallen.
- Bei distalen Extremitätenmuskeln Bahnung des H-Reflexes durch TCMS mit zwei Maxima bei negativen und kurzen Zeitintervallen und bei langen positiven Zeitintervallen.
- Das Interpeakintervall zwischen den Bahnungsmaxima der distalen Muskeln der oberen Extr. ist kürzer als bei den distalen Muskeln der unteren Extremität.
- Der H-Reflex wird beim gleichen Muskel bei kürzeren und negativen, wie auch bei längeren positiven Zeitintervallen durch stärkere Magnetfelder stärker gebahnt als durch schwächere.
- Die Stärke der Bahnung bleibt mit steigender Amplitude des Test-H-Reflexes in einem bestimmten Bereich konstant.

### 4.1 Bahnung und Hemmung des H-Reflexes bei proximalen und distalen Extremitätenmuskeln

In den Abbildungen 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 sind originale Messprotokolle wiedergegeben. Darin wird zum einen die deutliche Bahnung des H-Reflexes bei entsprechenden Zeitintervallen in Abb. 4.1 und 4.3 gezeigt. Außerdem kommt in Abb. 4.2 und 4.4 die Hemmung des H-Reflexes durch TCMS bei proximalen Extremitätenmuskeln in Situationen, bei welchen bei den distalen Muskeln eine Bahnung des H-Reflexes zu verzeichnen ist, zur Darstellung.

## M. flexor carpi rad.

04:42:21

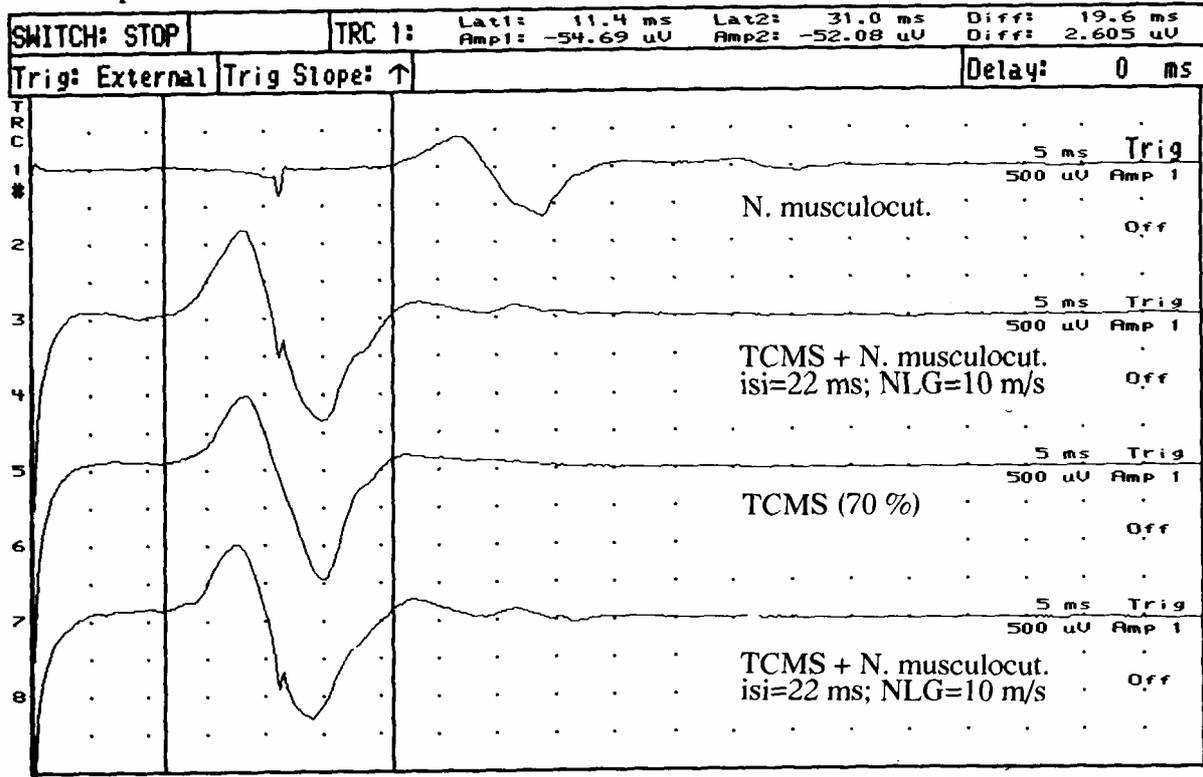
**Abb. 4.1**

Messprotokoll der Untersuchung des H-Reflexes des M. fl. c. r. bei einem Interstimulusintervall (isi) von 16 ms. Die erste Zeile stellt den H-Reflex unverändert dar, die zweite Zeile die Muskelantwort nach TCMS, die dritte und die vierte Zeile den durch Kombination beider Stimuli gebahnten H-Reflex (Beachte die Reizartefakte). Es wurde die zugehörige Nervenleitgeschwindigkeit für die kortikospinalen Fasern berechnet (NLG=11m/s).

Die Abb. 4.1 zeigt die ausgeprägte Bahnung des H-Reflexes des M. fl. c. r. bei einem  $\Delta t$  von 16 ms, das einer Nervenleitgeschwindigkeit der mutmaßlich beteiligten kortikospinalen Fasern von 11 m/s entspräche. Bemerkenswert ist die Konstanz der gebahnten H-Reflex-Amplitude.

M. biceps

04:42:26

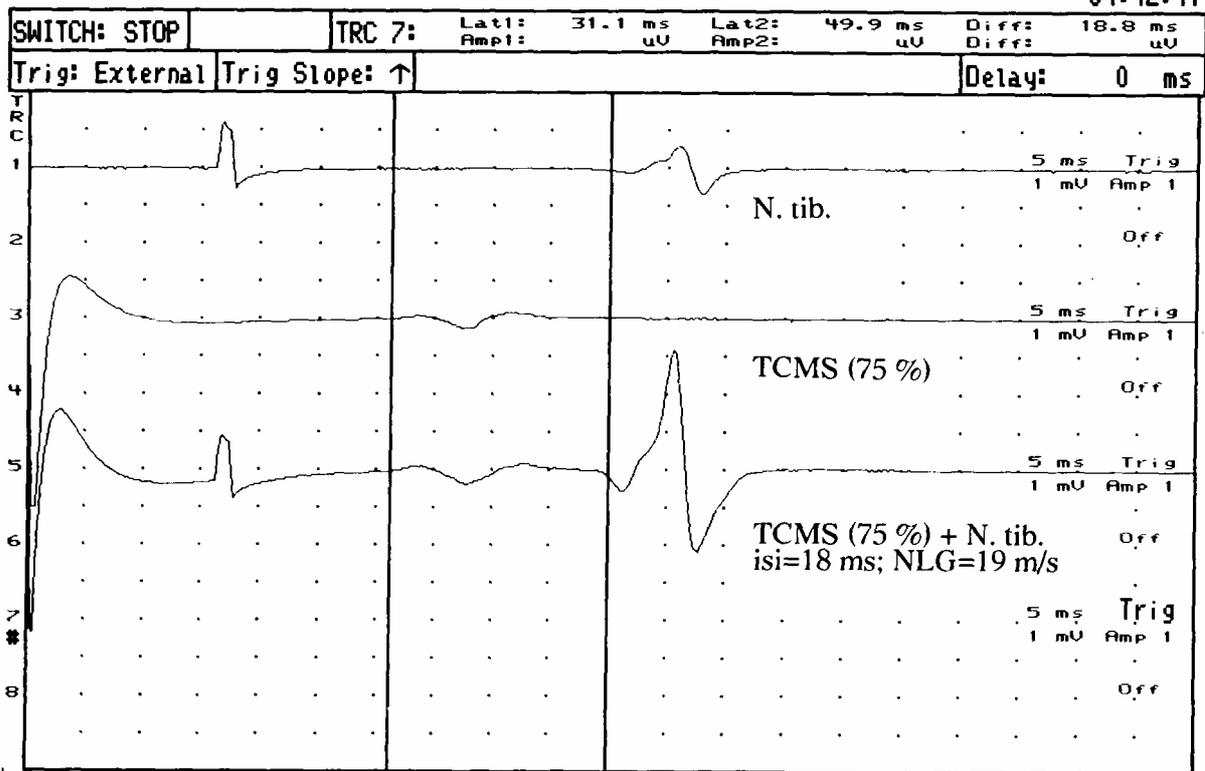
**Abb. 4.2**

Messprotokoll der Untersuchung des H-Reflexes des M. biceps bei einem Interstimulusintervall (isi) von 22 ms. Die erste Zeile stellt den H-Reflex unverändert dar, die dritte Zeile die Muskelantwort nach TCMS, die zweite und die vierte Zeile den durch Kombination beider Stimuli gehemmten H-Reflex (Beachte die Reizartefakte). Es wurde die zugehörige Nervenleitgeschwindigkeit für die kortikospinalen Fasern berechnet (NLG=10 m/s).

In der Abb. 4.2 ist die deutliche Hemmung des H-Reflexes des M. biceps bei einem  $\Delta t$  von 22 ms dargestellt. Die berechnete Nervenleitgeschwindigkeit der in Frage kommenden kortikospinalen Fasern entspräche 10 m/s. Trotz unterschiedlicher  $\Delta t$ s handelt es sich also bei den Abb. 4.1 und 4.2 wegen der verschiedenen Strecken um vergleichbare Situationen.

## M. gastrocnemius-soleus

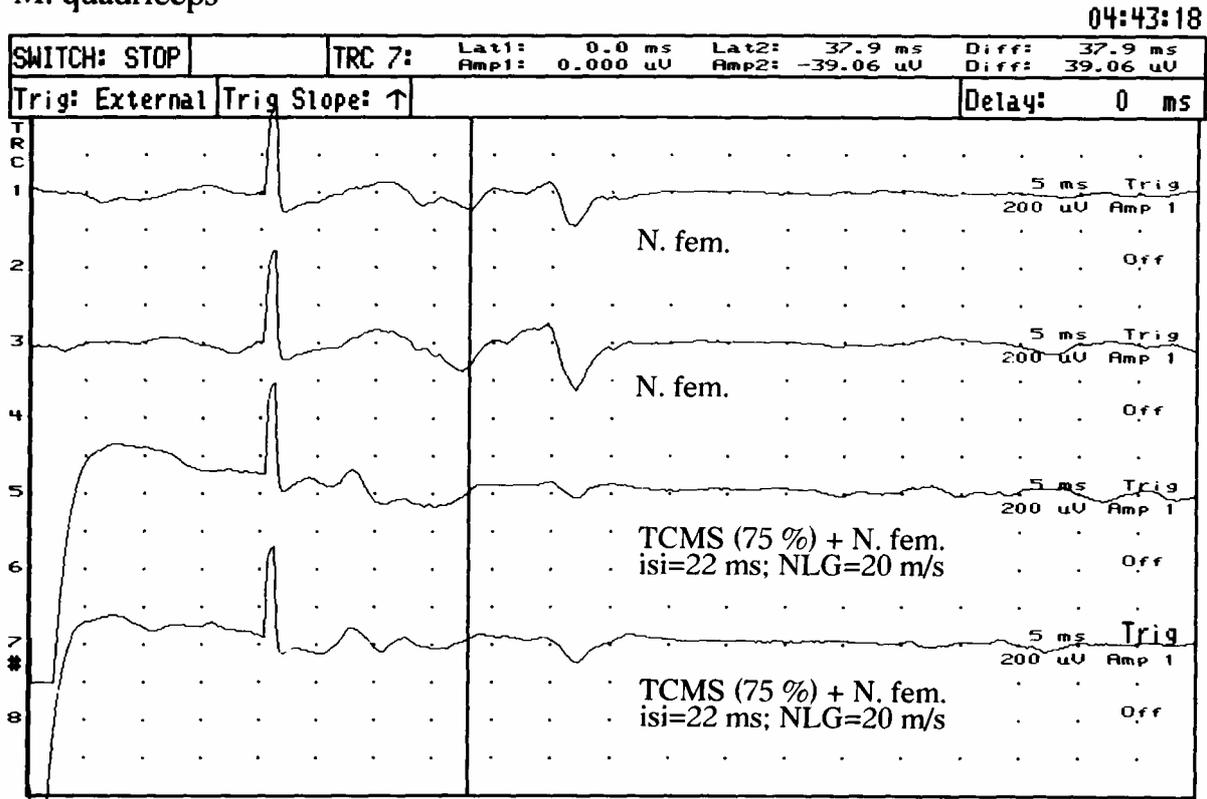
04:42:41

**Abb. 4.3**

Messprotokoll der Untersuchung des H-Reflexes des M. gastrocnemius bei einem Interstimulusintervall (isi) von 18 ms. Die erste Zeile stellt den H-Reflex unverändert dar, die zweite Zeile die Muskelantwort nach TCMS, die dritte Zeile den durch Kombination beider Stimuli gebahnten H-Reflex (Beachte die Reizartefakte). Es wurde die zugehörige Nervenleitgeschwindigkeit für die kortikospinalen Fasern berechnet (NLG=19 m/s).

Die Abb. 4.3 zeigt für den M. gastrocnemius, also einen distalen Muskel der unteren Extremität, die deutliche Bahnung des H-Reflexes bei einem  $\Delta t$  von 18 ms, wozu die kortikospinalen Fasern mit einer Nervenleitgeschwindigkeit von 19 m/s gehören würden. Der H-Reflex eines distalen Muskels wird also auch an der unteren Extremität bei einem Zeitintervall gebahnt, bei dem aktivierte, langsame kortikospinale Fasern eine wesentliche Rolle spielen.

## M. quadriceps

**Abb. 4.4**

Messprotokoll der Untersuchung des H-Reflexes des M. quadriceps bei einem Interstimulusintervall (isi) von 22 ms. Die erste und die zweite Zeile stellen den H-Reflex unverändert dar, die dritte und die vierte Zeile den durch Kombination beider Stimuli gehemmten H-Reflex (Beachte die Reizartefakte). Es wurde die zugehörige Nervenleitgeschwindigkeit für die kortikospinalen Fasern berechnet (NLG=20 m/s).

Die Abb. 4.4 zeigt die deutliche Hemmung des H-Reflexes des M. quadriceps bei einem Zeitintervall, bei dem kortikospinale Fasern mit einer Nervenleitgeschwindigkeit von 20 m/s aktiv wären. Damit sind also in Abb. 4.2 und 4.4, d.h. bei einem proximalen Muskel der oberen und der unteren Extremität vergleichbare Situationen dargestellt.

#### 4.2 Ergebnisse obere Extremität

In den Abb. 4.5 und 4.6 sind untereinander die Ergebnisse einiger Versuche an distalen, in Abb. 4.7 an proximalen Muskeln der oberen Extremität abgebildet.

Als Darstellungsform wählten wir die Auftragung der Amplitude des gebahnten H-Reflexes  $H_m$  gegen das zugehörige Zeitintervall  $\Delta t$ .

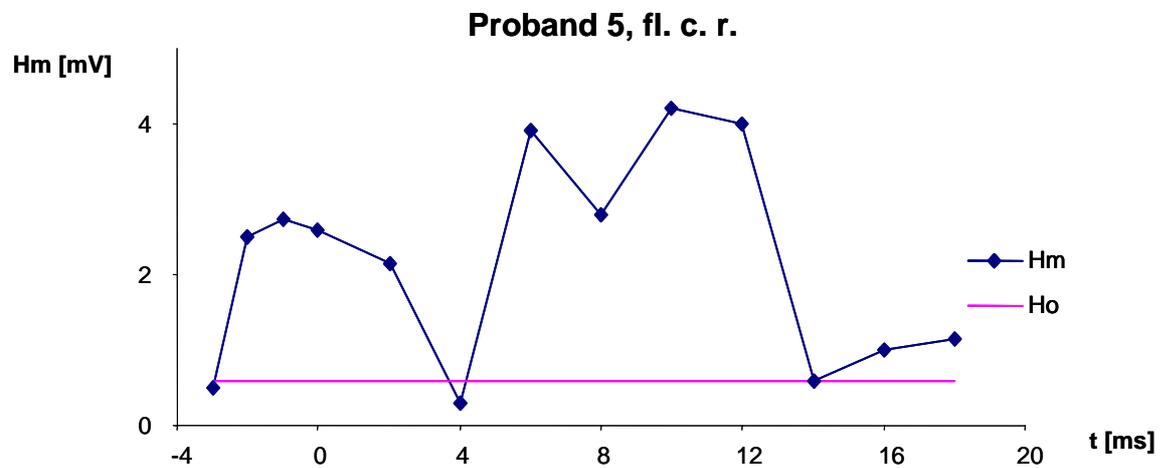
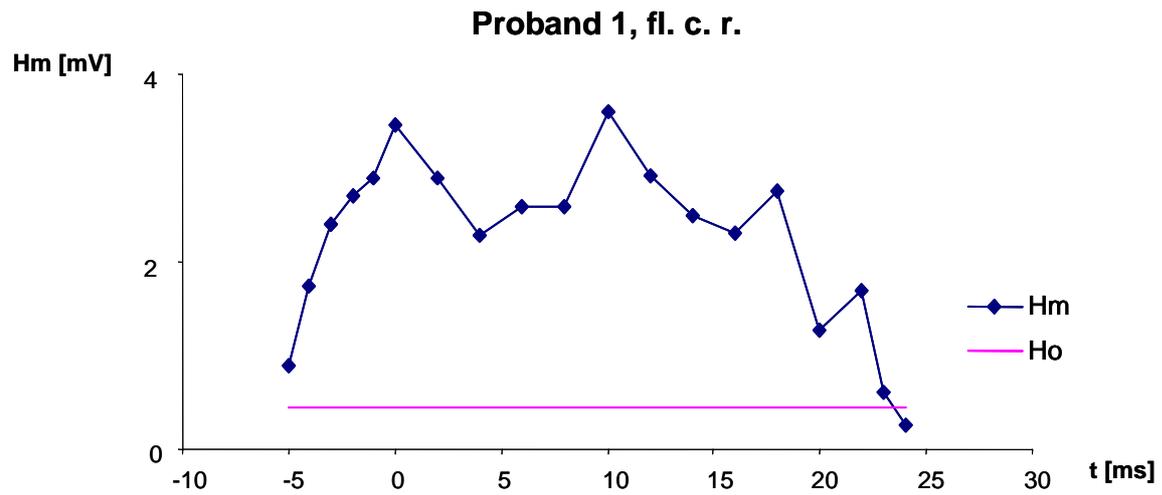
Der zweigipfelige Verlauf der Bahnung des H-Reflexes bei distalen Muskeln und der eingipfelige Verlauf bei proximalen Muskeln kommen deutlich zur Darstellung.

In den Tab. 4.1, 4.2 und 4.3 sind die zu den  $\Delta t$  der jeweils maximal, bzw. minimal gebahnten H-Reflexe gehörigen pyramidalen Nervenleitgeschwindigkeiten berechnet (vgl. Kap. III) und gemittelt. Bei den distalen Muskeln erscheint das erste, bzw. den langsamer leitenden Fasern entsprechende, Maximum durchschnittlich bei einem Intervall, das einer Leitgeschwindigkeit von 15,0 m/s entspräche. Ein zweites Bahnungsmaximum bei distalen Armmuskeln erscheint bei einem Intervall, das einer Leitgeschwindigkeit von durchschnittlich 29,7 m/s entspräche. Das Maximum bei den proximalen Armmuskeln erscheint durchschnittlich bei einem Intervall, das einer Leitgeschwindigkeit von 40,0 m/s entspräche. Eine Bahnung der H-Reflexamplitude bei längeren positiven Zeitintervallen bleibt aus oder es ist sogar eine Hemmung der H-Reflexamplitude zu beobachten.

Da es schwierig ist einen konstanten H-Reflex bei proximalen Muskeln abzuleiten, ist die Anzahl der verwertbaren Experimente bei den proximalen Armmuskeln geringer.

Die beiden Bahnungsmaxima der distalen Armmuskeln liegen durchschnittlich 9,6 ms auseinander. Diese Zahlen wurden aus allen verwertbaren Versuchen mit den acht Probanden berechnet.

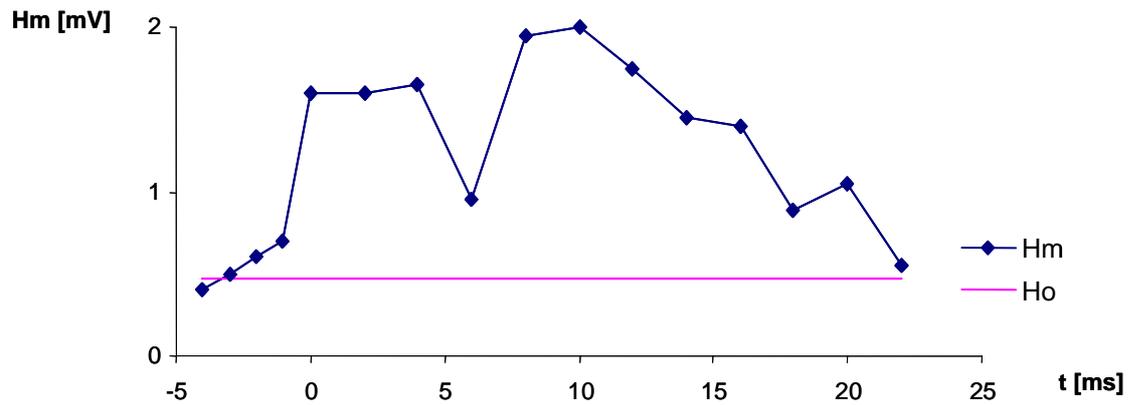
In den Tabellen sind jeweils die Ergebnisse mehrerer Versuche bezüglich eines Probanden gemittelt.



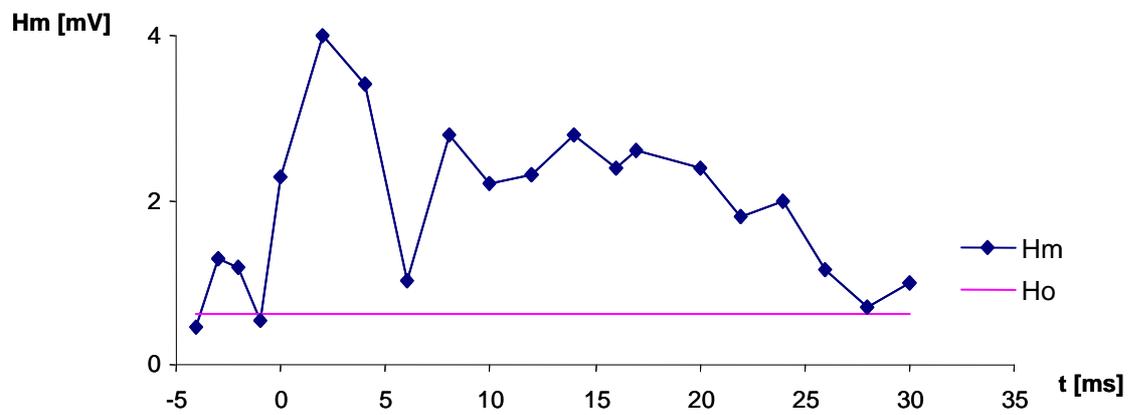
**Abb. 4.5**

Graphische Darstellung der Ergebnisse von Versuchen an den M. flexor carpi radialis zweier Probanden. Hm ist die Amplitude des gebahnten H-Reflex und Ho ist der Mittelwert der ungebahnten H-Reflexe.

### Proband 1, fl. p. I.

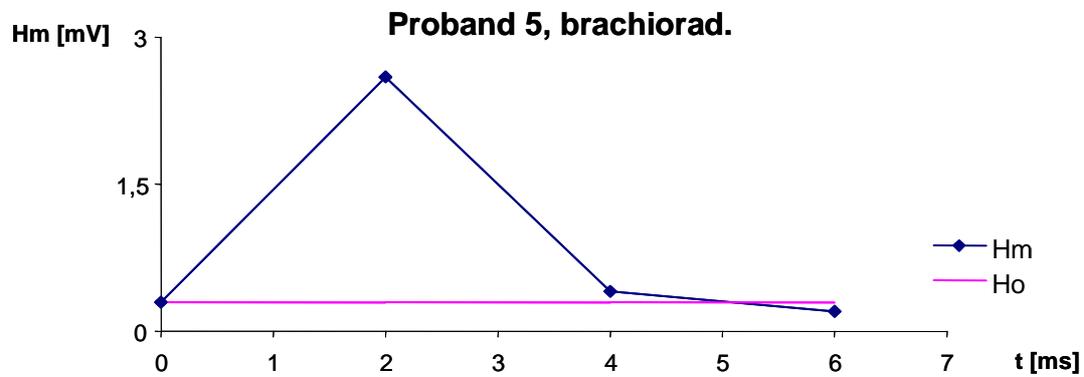
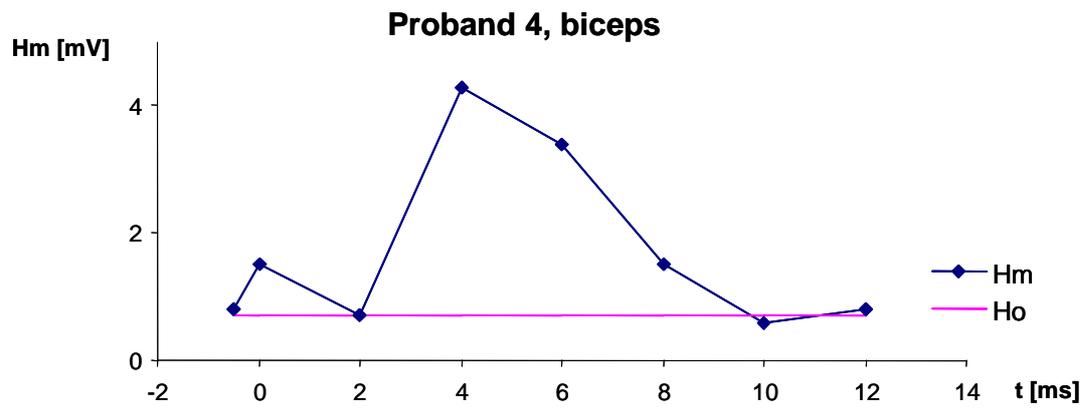
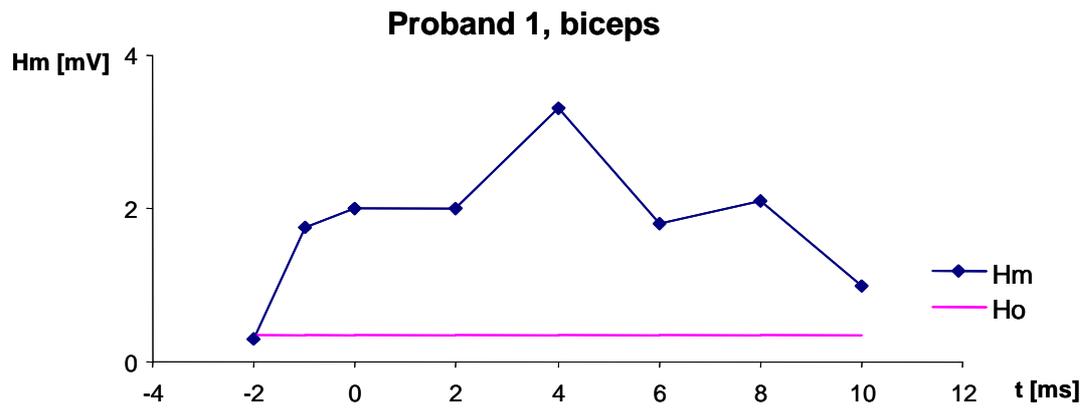


### Proband 4, fl. p.I.



#### **Abb. 4.6**

Die Ergebnisse für den M. flexor pollicis longus der Probanden 1 und 4. Die Darstellungsform entspricht der in Abb. 4.5 gewählten.



**Abb. 4.7**

Die Ergebnisse für den M. biceps der Probanden 1 und 4 und des M. brachioradialis des Probanden 5. Die Darstellungsform entspricht der in Abb. 4.5 gewählten.

**Tab. 4.1**M. flexor carpi radialis C6-C7 (n=7)

Proband	Maximum1	Minimum	Maximum2	$\Delta t$ (M2-M1)
1	14,3 m/s	22,0 m/s	31,0 m/s	9 ms
2	17,4 m/s	23,5 m/s	30,8 m/s	7 ms
3	16,0 m/s	20,5 m/s	32,0 m/s	8 ms
4	11,2 m/s	22,8 m/s	27,3 m/s	10 ms
5	13,9 m/s	23,5 m/s	27,6 m/s	8 ms
6	16,0 m/s	20,2 m/s	28,2 m/s	8 ms
7	18,3 m/s	23,9 m/s	29,1 m/s	10 ms
<i>Mittelwerte und Streubereiche</i>	<i>15,3 m/s (17,7-12,9)</i>	<i>22,3 m/s (23,8-20,8)</i>	<i>29,4 m/s (31,2-27,6)</i>	<i>8,6 ms (9,7-7,5)</i>

**Tab. 4.2**M. flexor pollicis longus C6-C8 (n=5)

Proband	Maximum1	Minimum	Maximum2	$\Delta t$ (M2-M1)
1	16,3 m/s	18,5 m/s	34,0 m/s	10 ms
2	16,0 m/s	24,0 m/s	34,0 m/s	9 ms
4	17,0 m/s	19,7 m/s	27,0 m/s	11 ms
6	11,5 m/s	20,9 m/s	27,0 m/s	12 ms
8	11,3 m/s	19,7 m/s	28,0 m/s	13 ms
<i>Mittelwerte und Streubereiche</i>	<i>14,4 m/s (17,2-11,6)</i>	<i>20,6 m/s (22,7-18,5)</i>	<i>30,0 m/s (33,7-26,3)</i>	<i>11,0 ms (12,6-9,4)</i>
<i>Mittelwerte Tab. 4.1 und 4.2 und Streubereiche</i>	<i>15,0 m/s (17,6-12,4)</i>	<i>21,6 m/s (23,5-19,7)</i>	<i>29,7 m/s (32,3-27,1)</i>	<i>9,6 ms (11,4-7,8)</i>

**Tab. 4.3**M. biceps brachii und M. brachioradialis, C5 -C6) (n=3)

Proband	Maximum	Muskel
<b>1</b>	<b>40,0 m/s</b>	<b>biceps brachii</b>
<b>4</b>	<b>45,0 m/s</b>	<b>biceps brachii</b>
<b>5</b>	<b>35,0 m/s</b>	<b>brachioradialis</b>
<b><i>Mittelwert</i></b>	<b><i>40,0 m/s</i></b>	

## 4.3 Ergebnisse untere Extremität

Entsprechend Abschnitt 4.2 sind in den Abb. 4.8 und 4.9 exemplarisch die Ergebnisse von einem proximalen und einem distalen Muskel des Beines graphisch dargestellt.

Aufgrund erheblicher Schwierigkeiten bei proximalen Beinmuskeln einen H-Reflex abzuleiten, gelang es uns nur bei zwei Probanden bei dieser Muskelgruppe ein verwertbares Versuchsergebnis zu erhalten. Die MN- Populationen der proximalen Muskeln sind, wie in früheren Arbeiten gezeigt (Uemura und Preston 1964, Preston et al. 1967; Stewart and Preston 1967) überwiegend hemmenden Einflüssen ausgesetzt, was diese Schwierigkeiten zum Teil erklären kann.

Auch bei der unteren Extremität zeigten die H-Reflexamplituden der distalen Muskeln (gastrocnemius/soleus und hallucis longus) ein zweigipfeliges Bahnungsverhalten, die der proximalen Muskulatur ein eingipfeliges Bahnungsverhalten.

In den Tab. 4.4 und 4.5 sind die Nervenleitgeschwindigkeiten aufgetragen, die den  $\Delta t$ s mit maximaler und minimaler H-Reflexbahnung nach der Berechnung gemäß Kap. III, entsprechen.

Bei den distalen Muskeln erscheint das erste, bzw. den langsamer leitenden Fasern entsprechende, Maximum durchschnittlich bei einem Intervall, das einer Leitgeschwindigkeit von 18,5 m/s entspräche. Ein zweites

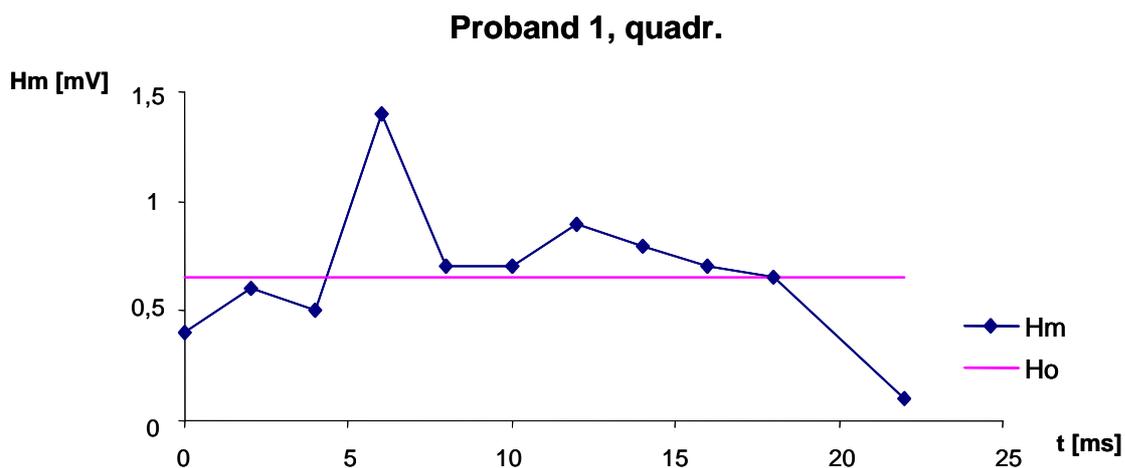
Bahnungsmaximum bei distalen Beinmuskeln erscheint bei einem Intervall, das einer Leitgeschwindigkeit von durchschnittlich 30,0 m/s entspräche.

Die beiden Maxima der distalen Beinmuskeln liegen durchschnittlich 12,7 ms auseinander.

Das Maximum bei der Ableitung proximaler Beinmuskeln liegt bei einem  $\Delta t$ , welches einer Leitgeschwindigkeit von 35,5 m/s entspricht.

Diese Zahlen wurden aus allen verwertbaren Versuchen mit den acht Probanden berechnet.

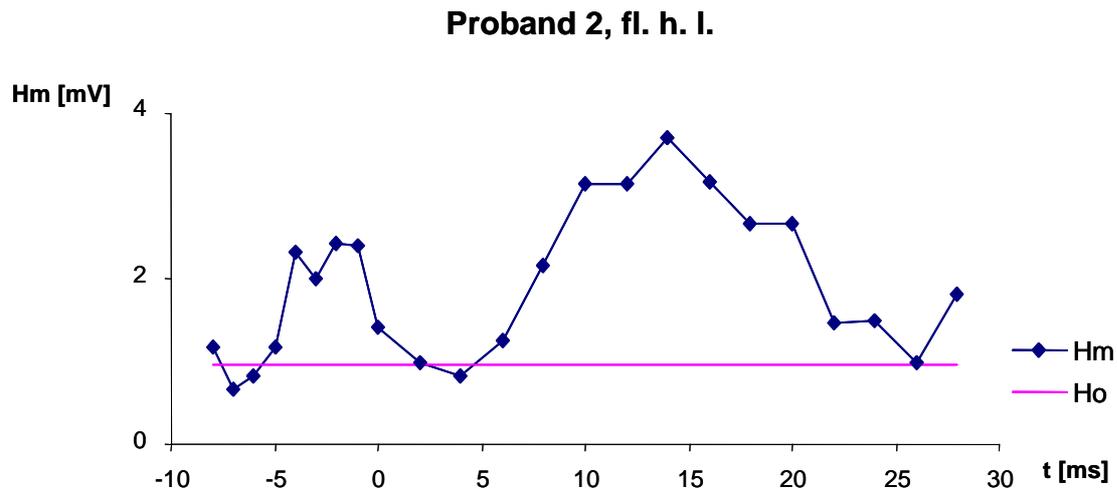
In den Tabellen sind jeweils die Ergebnisse mehrerer Versuche bezüglich eines Probanden gemittelt.



**Abb. 4.8**

Bahnungsverhalten des H-Reflex des M. quadriceps von Proband 1 durch TCMS. Die Darstellungsform entspricht der in Abb. 4.5 gewählten.

In der Abb. 4.8 kommt exemplarisch die deutliche Hemmung des H-Reflexes bei langen positiven Zeitintervallen zur Darstellung, wie es bei den Versuchen an proximalen Extremitätenmuskeln beobachtet wurde.

**Abb. 4.9**

Typisches zweigipfliges Bahnungsverhalten des H-Reflex beim M. fl. h. I. des Prob. 2. Die Darstellungsform entspricht der in Abb. 4.5 gewählten.

**Tab. 4.4**

M. flexor hallucis longus L5/S1/S2 (n=2)

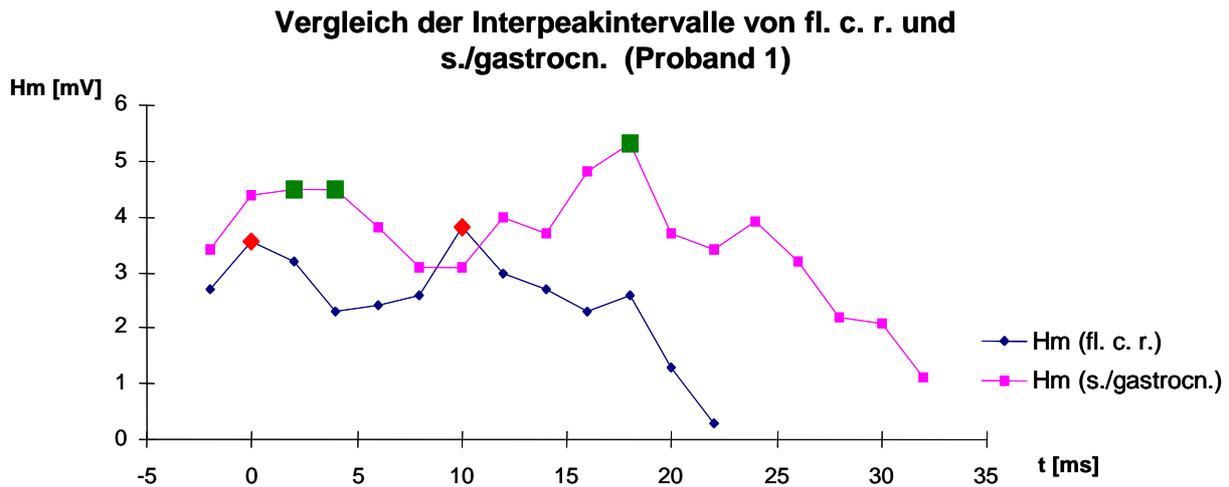
Proband	Maximum1	Minimum	Maximum2	$\Delta t$ (M2-M1)
1	18,4 m/s	25,0 m/s	30,0 m/s	16 ms
2	17,2 m/s	21,0 m/s	28,0 m/s	10,8 ms
<i>Mittelwerte</i>	<i>17,8 m/s</i>	<i>24,0 m/s</i>	<i>29,0 m/s</i>	<i>13,4 ms</i>

**Tab. 4.5**M. soleus/gastrocnemius (L5/S1/S2) (n=4)

Proband	Maximum1	Minimum	Maximum2	$\Delta t$ (M2-M1)
<b>1</b>	<b>19,0 m/s</b>	<b>21,7 m/s</b>	<b>34,0 m/s</b>	<b>16,0 ms</b>
<b>2 (gastr.)</b>	<b>18,6 m/s</b>	<b>24,0 m/s</b>	<b>30,0 m/s</b>	<b>12,0 ms</b>
<b>2 (soleus)</b>	<b>19,0 m/s</b>	<b>25,0 m/s</b>	<b>30,0 m/s</b>	<b>11,0 ms</b>
<b>4</b>	<b>18,5 m/s</b>	<b>22,3 m/s</b>	<b>28,0 m/s</b>	<b>10,0 ms</b>
<b><i>Mittelwerte und Streubereiche</i></b>	<b><i>18,8 m/s (19,1-18,5)</i></b>	<b><i>23,3 m/s (24,8-21,7)</i></b>	<b><i>30,5 m/s (33,0-28,0)</i></b>	<b><i>12,3 ms (14,9-9,7)</i></b>
<b><i>Mittelwerte Tab. 4.4 und 4.5 und Streubereiche</i></b>	<b><i>18,5 m/s (19,2-17,8)</i></b>	<b><i>23,2 m/s (24,9-21,5)</i></b>	<b><i>30,0 m/s (32,2-27,8)</i></b>	<b><i>12,7 ms (15,4-10,0)</i></b>

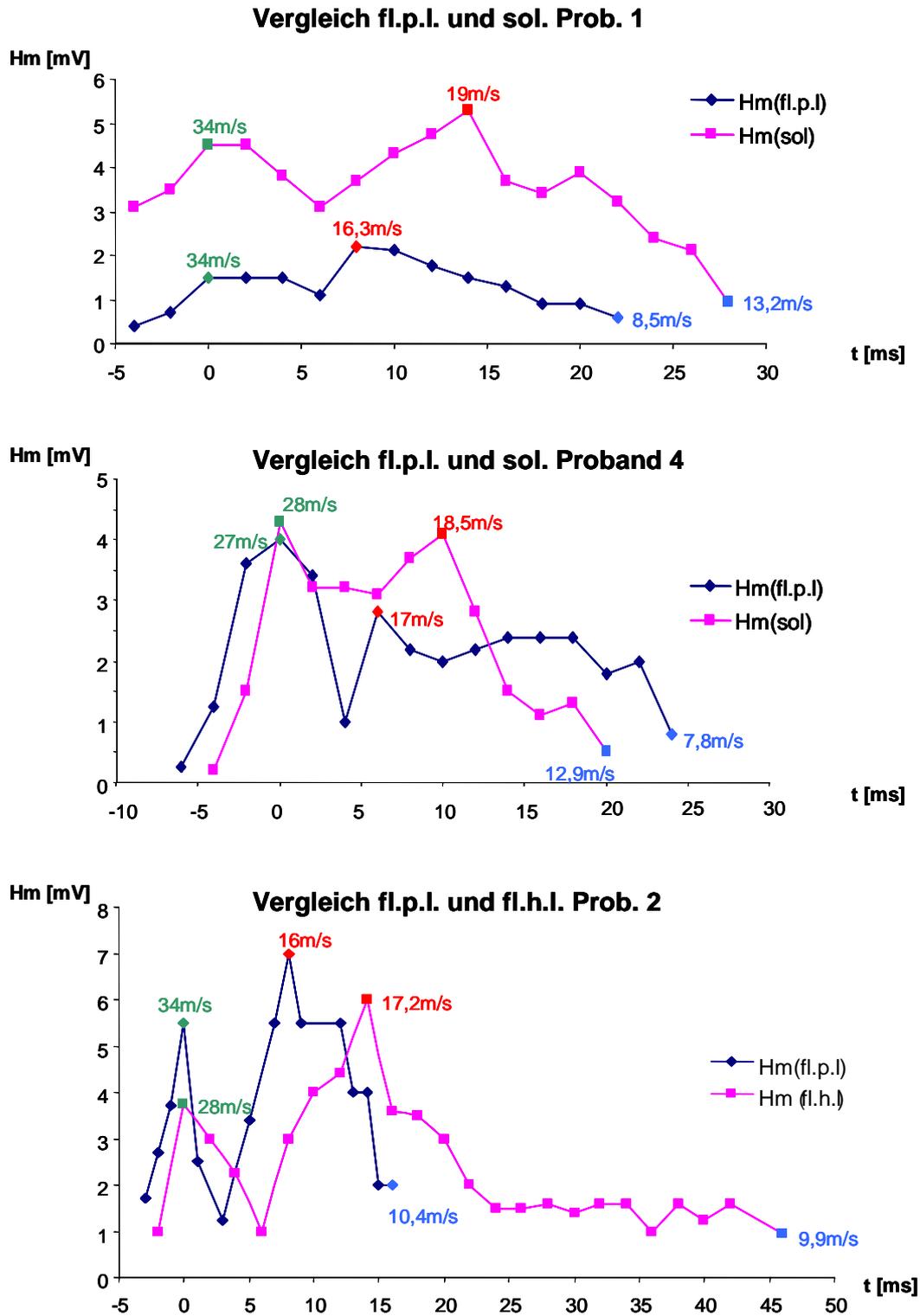
## 4.4 Die Ergebnisse von oberer und unterer Extremität im Vergleich

In Tab.4.6 sind die Leitgeschwindigkeiten, bei denen es bei distalen Muskeln von oberer und unterer Extremität bei der Bahnung des H-Reflexes zu Maxima kam, zusammengefasst. Mit eingetragen sind die Zeitintervalle, die zwischen den Maxima liegen. Diese sind für die untere Extremität, wie wegen der längeren Strecke von Kortex zu Lumbalmark zu vermuten, deutlich länger (siehe Kap. V). Dies ist in Abb. 4.10 nochmals anhand einer Gegenüberstellung eines Ergebnisses von oberer und unterer Extremität in einem Diagramm dargestellt.

**Abb. 4.10**

Gegenüberstellung der Ergebnisse von Versuchen an M. s./gastrocn. und M. fl.c.r. von Proband 1. Als Darstellungsweise ist die Auftragung der Amplitude des gebahnten H-Reflex (Hm) gegen die zugehörigen Zeitintervalle ( $\Delta t$ ) gewählt. Die Maxima des s./gastr.-Experiments kommen bei  $\Delta t=2/4$  und 18 ms grün gekennzeichnet zur Darstellung. Die Maxima des fl.c.r.-Experiments kommen bei  $\Delta t=0$  und 10 ms zur Darstellung. Damit wird beispielhaft das kürzere Interpeakintervall bei distalen Muskeln der oberen Extremität verdeutlicht.

Zur Überprüfung der These, dass der zweite Bahnungspeak durch in langsameren PBF geleiteten, zentral ausgelösten Erregungen zustande kommt, normierten wir in Abb. 4.11 den jeweils ersten Bahnungspeak eines distalen Muskels der oberen und unteren Extremität beim jeweils gleichen Probanden auf  $t=0$  ms und prüften, ob den sich entsprechenden Maxima vergleichbare Nervenleitgeschwindigkeiten zugeordnet werden konnten. Es zeigte sich, dass die errechneten Nervenleitgeschwindigkeiten der entsprechenden Bahnungsmaxima annähernd gleich waren. Ein essentieller Beleg für die Annahme, dass die sich entsprechenden Bahnungsmaxima eines MN-Pools distaler Muskeln der oberen und unteren Extremität eines Probanden durch sich entsprechende PBF-Populationen verursacht werden. Die Zahlen sind in Tab. 4.6 zusammengefasst.

**Abb. 4.11**

Gegenüberstellung der Nervenleitgeschwindigkeiten der frühen und späten Maxima distaler Muskeln. Bei  $t=0\text{ms}$  wurde jeweils das erste Maximum aufgetragen. Die korrespondierenden Nervenleitgeschwindigkeiten und Bildpunkte wurden in gleicher Farbe dargestellt.

**Tabelle 4.6**

	$\Delta t_{p1}$ (ms)	$c_{p1}$ (m/s)	$c_{ctp1}$ (ms)	$\Delta t_{p2}$ (ms)	$c_{p2}$ (m/s)
O.E.	<b>0(-1-+2)</b>	<b>28,6(34-26)</b>	<b>8,4(9,3-7)</b>	<b>8(6-12)</b>	<b>15,8(18,3-12,7)</b>
U.E.	<b>4(-2-+10)</b>	<b>31,8(38,6-28)</b>	<b>19,4(22-16)</b>	<b>18(22-16)</b>	<b>18,5(20,6-17,2)</b>

	$\Delta t_{p1}-\Delta t_{p2}$	$c_{p1}/c_{p2}$	$\Delta t_{im}-\Delta t_{p1}$ (ms)
Forts. O.E.	<b>8(10-6)</b>	<b>1,9(2,2-1,6)</b>	<b>4(6-2)</b> <i>(8 Probanden, 14 Messungen)</i>
Forts. U.E.	<b>14(18-12)</b>	<b>1,8(1,9-1,5)</b>	<b>5(6-4)</b> <i>(3 Probanden, 5 Messungen)</i>

Interstimulusintervalle ( $\Delta t$ ) und entsprechende Leitgeschwindigkeiten ( $c$ ) der Bahnungsmaxima ( $p1$ ,  $p2$ ) der distalen Muskeln der oberen (O.E.) und unteren (U.E.) Extremität. Das Intervall zwischen den Maxima ist bei der unteren Extremität länger, während sich die Leitgeschwindigkeiten und das Intervall zwischen erstem Maximum und intermode-minimum ( $t_{im}$ ) nicht signifikant ändern

Beginn, Dauer und Ende der erhöhten Erregbarkeit spinaler  $\alpha$ -Motoneurone wurde in den Tabellen 4.7 für distale Muskeln und 4.8 für proximale Muskeln zusammengefasst. Dabei wurde das bei den MN distaler Muskeln auftauchende Minimum außer Acht gelassen; es kam uns darauf an, die Dauer zwischen frühester und spätester Bahnungsmöglichkeit zu messen. Es zeigt sich, dass die gesamte Dauer der Bahnbarkeit des H-Reflexes bei distalen und proximalen Muskeln der unteren Extremität deutlich länger ist als bei entsprechenden Muskeln der oberen Extremität. Ein Befund, der unter der Annahme, dass die Dauer der Phase erhöhter Erregung der MN-Populationen entsprechender Muskeln an Arm und Bein von vergleichbaren kortikospinalen Faserkontingenten bestimmt wird, obligat ist.

**Tabelle 4.7**

	Beginn der Bahnung (B.)		Ende der B.		Dauer der B. t(ms)
	$\Delta t$ (ms)	c(m/s)	$\Delta t$ (ms)	c(m/s)	
Obere Extr. <i>8 Probanden</i>	<b>-3 (-5-0)</b>	<b>57 (34-68)</b>	<b>20 (6-32)</b>	<b>10,2 (6,3-19,6)</b>	<b>23 (7-35)</b>
Untere Extr. <i>3 Probanden</i>	<b>-4 (-8--2)</b>	<b>55,6 (31-67)</b>	<b>30 (26-34)</b>	<b>13,7 (13-15,4)</b>	<b>34 (28-42)</b>

Beginn und Ende der Bahnung mit den entsprechenden Nervenleitgeschwindigkeiten und Dauer der Bahnungsphase distaler Muskeln. Mittelwerte mit Bereichen. Obere Extr.: fl.c.r, fl.p.l; 8 Probanden, 14 Messungen. Untere Extr.: gastrocnemius, soleus, fl.h.l; 3 Probanden, 5 Messungen.

**Tab. 4.8**

	Beginn der Bahnung		Ende der Bahnung		Dauer t(ms)
	$\Delta t$ (ms)	c(m/s)	$\Delta t$ (ms)	c(m/s)	
Obere Extr. <i>4 Probanden</i>	<b>4 (2-4)</b>	<b>51 (45-58)</b>	<b>8 (10-4)</b>	<b>22,8 (21-27)</b>	<b>4 (6-2)</b>
Untere Extr. <i>2 Probanden</i>	<b>9 (10-8)</b>	<b>55 (51-59)</b>	<b>16 (14-18)</b>	<b>25 (22-28)</b>	<b>7 (8-6)</b>

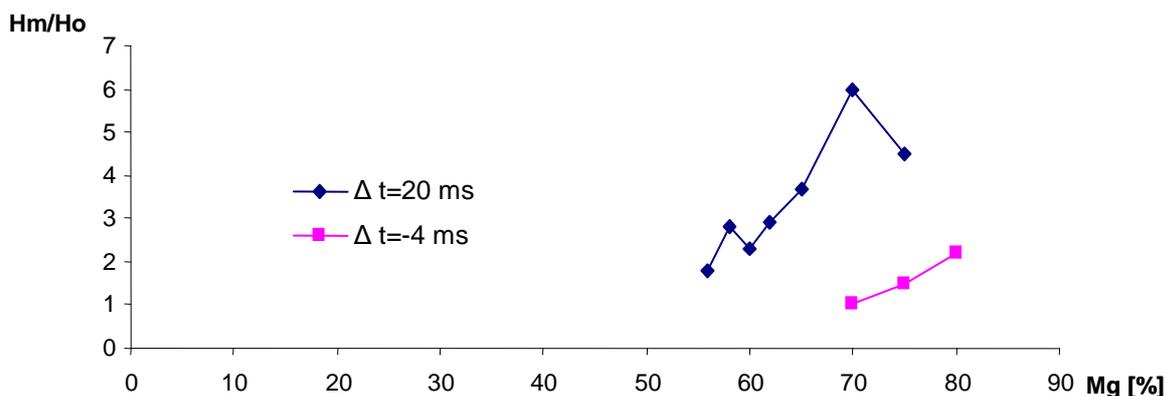
Beginn und Ende der Bahnung mit den entsprechenden Nervenleitgeschwindigkeiten, Dauer der Bahnungsphase des H-Reflexes proximaler Muskeln von oberer und unterer Extremität. Mittelwerte mit Bereichen

#### 4.5 Abhängigkeit der Fazilitierung des H-Reflexes von der Stärke des Magnetreizes

Wie schon in Kap. III erwähnt ist die Fazilitierung des H-Reflexes abhängig von der Stärke des bahnenden TCM-Reizes. Zusätzlich zur Abb.3.3 in Kapitel III ist hier in der Abb. 4.12 dieser Sachverhalt bei zwei unterschiedlichen  $\Delta t$  (-4 und 20 ms) und einem distalen Muskel dargestellt. Beide Zusammenhänge sind näherungsweise linear, wenn auch mit leicht unterschiedlicher Steigung. Bemerkenswert ist es, dass die Steigung bei  $\Delta t=20$  ms (langsameren PBF entsprechend) höher ist, als bei  $\Delta t=-4$  ms.

Käme das zweite Bahnungsmaximum, das wir den langsameren PBF zuordnen, aufgrund einer durch Interneurone bewirkten Verzögerung des zentralen Reizes zustande, wären keine unterschiedliche Steigung zu erwarten, da dann bei  $\Delta t=20$  ms und  $\Delta t=-4$  ms die gleichen PBF involviert wären.

**Abhängigkeit der H-Reflexbahnung von der TCMS-Stärke bei  $\Delta t = -4$  und 20 ms**



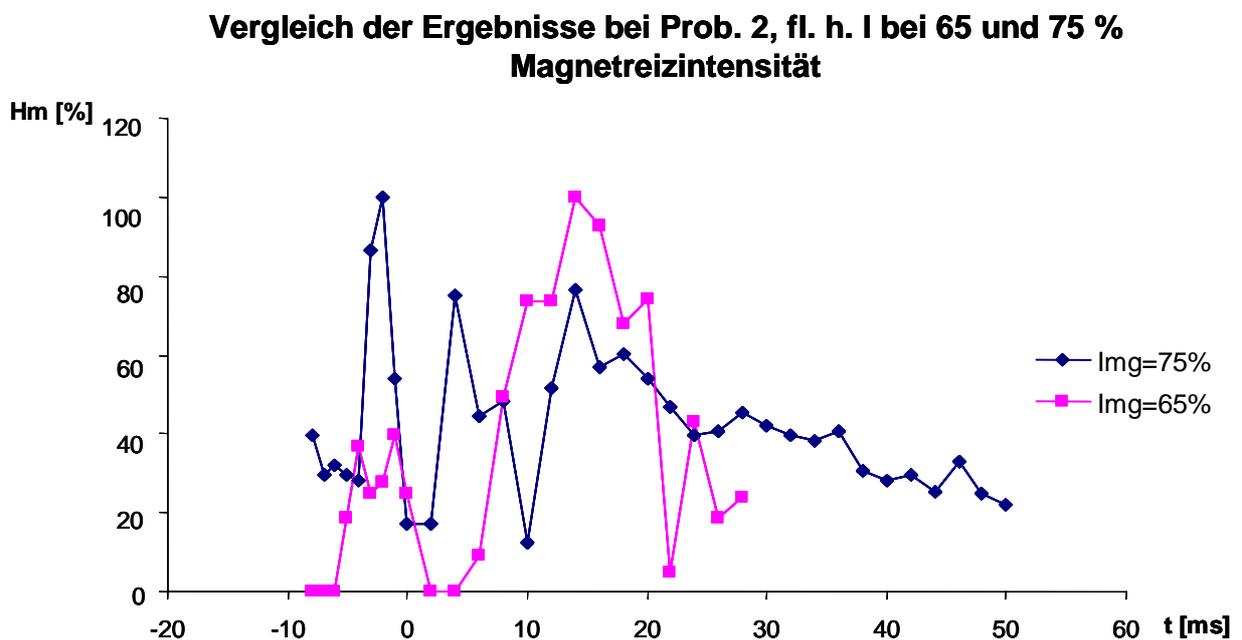
**Abb. 4.12**

Die Dynamik der Abhängigkeit der Bahnbarkeit des H-Reflexes bei kurzen und langen Interstimulusintervallen von der Stärke des Magnetreizes.

Durch die direkte Gegenüberstellung zweier Messreihen am gleichen Probanden und gleichen Muskel, bei unterschiedlicher TCMS-Intensität, wie in

Abb. 4.13, wird deutlich, dass die Bahnungsphase durch höhere zentrale Reizstärken gestreckt werden kann.

Es zeigt sich, dass bei einer höheren Magnetreizintensität zusätzlich zur stärkeren Bahnung des H-Reflexes bei einem bestimmten  $\Delta t$  (siehe Abb. 3.3, Kap. III und Abb. 4.12) die Bahnung früher, d.h. bei kürzeren und negativen  $\Delta t$  einsetzt und länger, d.h. bei größeren positiven  $\Delta t$  noch anhält. Siehe dazu auch die Abb. 4.14 und 4.15.



**Abb. 4.13**

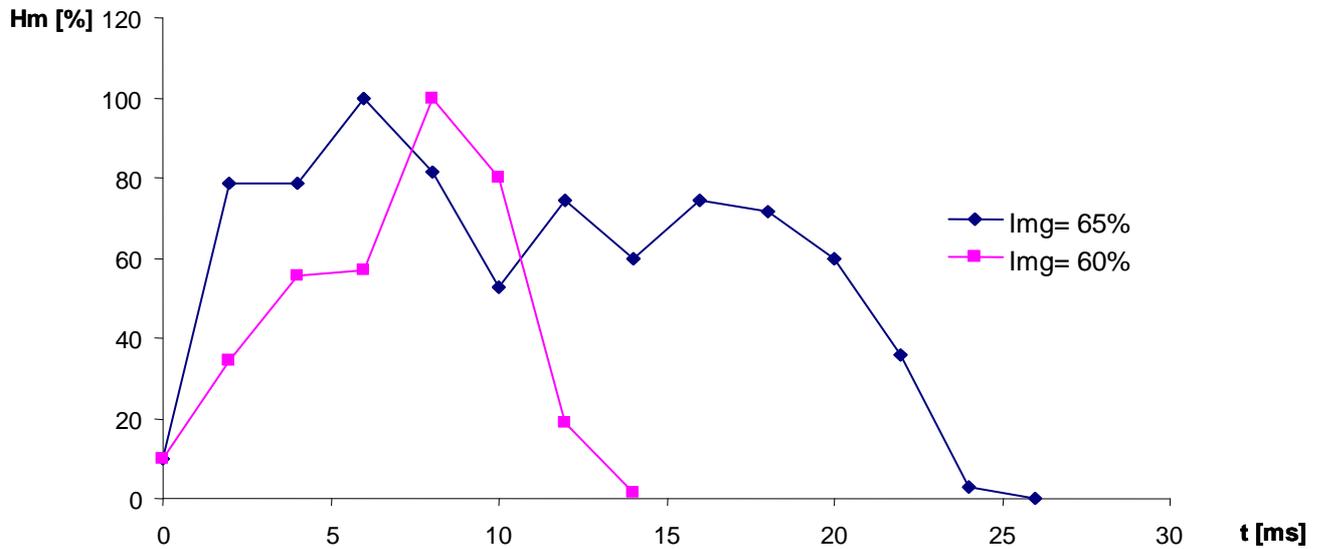
Vergleich der Meßreihen des M. fl.h.l. bei unterschiedlichen TCMS-Reizintensitäten (Img) am Beispiel des Probanden 2. Hier wurden als y-Werte die Beträge der Amplitudenzunahme des H-Reflex durch Bahnung anteilig dargestellt mit der jeweils maximalen Amplitudenzunahme als 100%.

In Abb. 4.14 ist dargestellt, dass dieses Ergebnis an einem anderen Muskel bei Proband 2 reproduziert werden konnte.

In Abb. 4.15 ist dargestellt, dass dieses Ergebnis auch bei verschiedenen Probanden am selben Muskel reproduziert werden konnte.

Wir interpretieren diesen Befund so, dass bei höheren Magnetreizstärken unselektiv bzgl. ihrer NLG mehr PBZ rekrutiert werden.

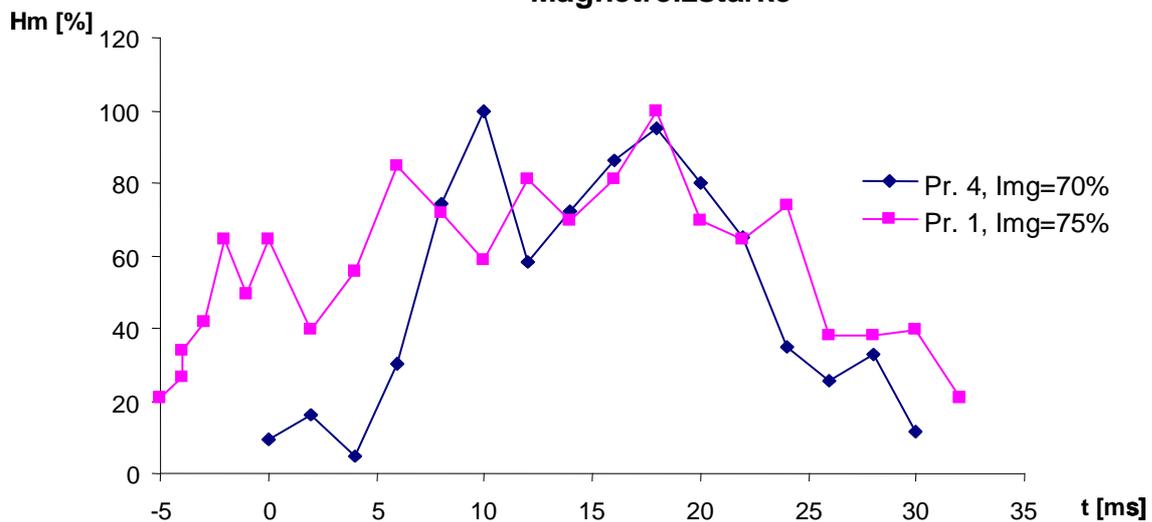
### Vergleich Soleus Proband 2 mit 60% und 65% Magnetreizstärke



**Abb. 4.14**

Gegenüberstellung der H-Reflexbahnung am gleichen Probanden und Muskel bei unterschiedlichen Magnetreizstärken [Img].

### Vergleich s./gastr. bei 75% (Prob 1) und 70% (Prob. 4) Magnetreizstärke



**Abb 4.15**

Gegenüberstellung der H-Reflexbahnung beim selben Muskel verschiedener Probanden bei unterschiedlichen Magnetreizstärken.

#### 4.5.1 Abhängigkeit der Bahnungsstärke $m$ von der Magnetreizstärke $I_{tc}$

Die in Abb. 3.3 dargestellte, annähernd lineare Beziehung zwischen  $m$  und  $I_{tc}$  rechtfertigt die Annahme einer linearen Übertragung der summierten kortikomotoneuronalen Eingangserregung am spinalen Motoneuron, das als Integrator wirkt. Es gilt dann

$$x_i = k_i \cdot n_{cm}(I_{tc}) \quad (1)$$

$n_{cm}$  ist die Anzahl der durch den transkraniellen Reiz aktivierter kortikospinaler Fasern.  $n_{cm}$  sei für jedes Motoneuron gleich groß.  $k_i$ , der lineare Übertragungsfaktor sei wie  $x_i$  eine gleichverteilte Zufallsgröße. Außerdem mag gelten:  $n(I_{tc}) = k_2(I - I_0)$ , also eine lineare Abhängigkeit zwischen  $n$  und  $I$ .

Daraus ergibt sich:

$$x_i = k_i \cdot k_2(I - I_0) \quad (2)$$

$$\sum x_i \cdot p(x_i) = \sum k_i \cdot p(k_i) \cdot k_2(I - I_0)$$

$$\sum x_i \cdot p(x_i) = k_2(I - I_0) \cdot \sum k_i \cdot p(k_i)$$

$$\bar{x} = \bar{k} \cdot k_2(I - I_0) \quad (3)$$

Da  $m = 1 + \left(\frac{N}{n_0} - 1\right) \cdot \bar{x} \cdot p_{ER}(x)$  folgt:

$$m = 1 + \left(\frac{N}{n_0} - 1\right) \cdot p_{ER}(x) \cdot \bar{k}_i \cdot k_2 \cdot (I - I_0) \quad (4)$$

Im Beispiel der Abb. 3.3 beträgt der Maximalwert von  $m$  ( $m_{max}$ ) 11,4 bei  $I = 80\%$ ; der Wert  $m = 1$  wird bei  $I = I_0 = 47\%$  erreicht. Daraus ergibt sich aus (3) für ein  $\bar{x}_{max} \equiv 10mV$ :

$$\bar{k}_i \cdot k_2 = \frac{10}{33}$$

und:

$$\left(\frac{N}{n_0} - 1\right) = (m - 1) \cdot 18 \cdot \frac{33}{10 \cdot 33} = 10,4 \cdot \frac{18}{10} = 18,7$$

Eingesetzt in (4) ergibt sich als Geradengleichung:

$$m = 1 + \frac{18,7}{18} \cdot \frac{10}{33} (I - I_0); m = 1 + 0,315(I - I_0).$$

$$I_0 = 47\%$$

$$m = 1 + 0,315(I - 47)$$

#### 4.6 Abhängigkeit der Amplitude des gebahnten H-Reflexes $H_m$ von der Amplitude des ungebahnten H-Reflexes $H_0$

Die Abb. 3.4 zeigt, dass  $H_m$  proportional  $H_0$  ist. Die Proportionalitätskonstante  $H_m/H_0$  ist  $m$ . Damit  $m$  trotz Änderung von  $n$  konstant bleibt, muss in der Gleichung

$$m - 1 = \left(\frac{N}{n_0} - 1\right) \cdot \overline{x_{tc}} \cdot p_{ER}(x)$$

$p_{ER}(x)$  im selben Maße wachsen, bzw. abnehmen, wie der Ausdruck

$\frac{N}{n_0} - 1$  bei wachsendem, bzw. abnehmendem  $n_0$  ab-, bzw. zunimmt. Diese

Bedingung ist erfüllt, wenn

$$\frac{k}{p_{ER}(x)} = \frac{N}{n_0} - 1$$

und

$$k = p_{ER}(x) \cdot \left(\frac{N}{n_0} - 1\right)$$

dann gilt

$$m - 1 = k \cdot \overline{x_{tc}} \quad \text{und} \quad m = 1 + k \overline{x_{tc}} = \text{konstant,} \quad \text{bei gegebenem } \overline{x_{tc}}.$$

Der Zusammenhang wird plausibel, wenn man berücksichtigt, dass mit steigender Intensität des ER und damit wachsendem  $n_0$ , bzw.  $H_0$  der

Streubereich von  $x_{ER}(20 - x_{ER \min})$  abnimmt, und damit  $p_{ER}(x) = \frac{1}{20 - x_{\min}}$

zunimmt.

Das Ergebnis der Abb. 3.4 zugrunde liegenden Messung legt also nahe, dass die Bahnungsstärke  $m$  ausschließlich von der mittleren Depolarisationswirkung  $\overline{x}$  des kortiko-motoneuronalen Inputs und dem konstanten Produkt von

$\left(\frac{N}{n_0} - 1\right) \cdot p_{ER}(x)$  bestimmt wird.

Wenn  $k = 1$  wird

$$\frac{1}{p_{ER}(x)} = \frac{N}{n_0} - 1 \quad \text{und} \quad m = 1 + E(x_{tc}) \quad \text{bzw.} \quad \frac{H_m}{H_0} = 1 + E(x_{tc})$$

$H_0$ [mV]	$H_{mber}$ [mV]	$H_{mgem}$ [mV] aus Abb. 3.4
0,5	2,5	2,5
0,8	4,0	3,8
1,4	7,0	7,1

**Tab. 4.9**

Die Tabelle stellt die empirischen Werte der Abb. 3.4 und die nach der Gleichung

$\frac{H_m}{H_0} = 1 + E(x_{tc})$  berechneten ( $E(x_{tc}) = 4$ ) gegenüber.

$I - I_0$	$M_{gem}$	$M_{ber}$
0	1	1
3	2	1,95
8	3,5	3,52
13	5,4	5,1
28	9,1	9,8
33	11,4	11,4

**Tab. 4.10**

Zusammenhang zwischen Stärke des Magnetreizes und der Bahnungsstärke.

## V Diskussion

### 5.1 Der Zeitverlauf der Bahnung ist durch die unterschiedliche Leitgeschwindigkeit des bahnenden kortikospinalen Inputs bedingt

In Übereinstimmung mit den Resultaten human- und tierexperimenteller Studien (Cowan et al. 1986; v. d. Linden and Bruggemann 1993; Preston et al. 1967) zeigen unsere Ergebnisse, dass einem magnetelektrischen kurzen Einzelreiz des motorischen Kortex eine bis zu 35 msec dauernde Phase gesteigerter Erregbarkeit des spinalen Motoneuronpools folgt. Diese lässt sich durch eine bahnende Wirkung auf den H-Reflex nachweisen. Die Bahnung ist nicht zeitlich gleichverteilt, sondern durch ein intermodales Minimum in ein frühes und spätes Segment gegliedert. Diese Segmente gipfeln in entsprechenden Bahnungsmaxima. Das frühe Segment entspricht dem Zeitraum der überschwellig monosynaptischen Erregung der spinalen Motoneurone durch die schnell leitende Komponente der Pyramidenbahn, die auch das MEP des Muskels erzeugt. In der Zeit des späten Segmentes lässt sich keine direkte kortikospinale Reizwirkung auf den Muskel nachweisen. Frühes und spätes Segment der Reflexbahnungskurve eignet nur der distalen Muskulatur der oberen und unteren Extremität, während die Modulation der Reflexerregbarkeit proximaler Muskeln (Biceps, Quadriceps) mit der frühen Phase endigt oder in eine Hemmung übergeht. Unterschiedliche zeitliche Verläufe der kortikal konditionierten spinalen Reflexerregbarkeit proximaler und distaler Muskeln hatten auch Preston und Whitlock (1960) beim Affen beschrieben: Die distale Muskulatur der oberen Extremität weist eine triphasisch konditionierte Reflexmodulation mit früher Bahnung, kurzer Hemmung und später, langdauernder Bahnung auf. Der Bizepsreflex hingegen wird biphasisch nach kurzer Bahnung gehemmt. Die Autoren begründen diese unterschiedliche kortikale Beeinflussung der Reflexerregbarkeit mit unterschiedlichen Wirkfunktionen des motorischen Kortex: Hemmung der proximalen antischwerkraft Halteinnervation zur

Vorbereitung kinetischer Innervationsprogramme und Bahnung kinetischer und feinmotorischer Leistungen distaler Gliedabschnitte.

Als Korrelat der langdauernden frühen und späten kortikal konditionierten Bahnung fanden Preston und Whitlock (1960) nach kurzen kortikalen Einzelreizen zusammengesetzte (compound) unterschwellige EPSP entsprechender Dauer, die über einen längeren Zeitraum zeitversetzte, durch elektrischen Hinterwurzelreize erzeugte unterschwellige EPSP zur Ia-Reflex verstärkenden Entladungsschwelle brachten.

Einige Neurone reagierten mit einem langdauernden IPSP oder mit einer EPSP-IPSP-Folge. Diese Elementarreaktionen der einzelnen Neurone summieren sich zu einem durch die summierten IPSP gekerbten und verminderten Pool-EPSP, das die Grundlage für den triphasischen, oder – je nach dem Verhältnis von gehemmten und depolarisierten Elementen – biphasischen Zeitverlauf der kortikal konditionierten spinalen Erregbarkeitsänderung bildet. Die typischen bi- und triphasisch konditionierten Änderungen der spinalen Ia-Reflexerregbarkeit wurden in so genannten pyramidalen Präparaten erzeugt, in denen bis auf die Pyramidenbahn alle anderen supraspinalen efferenten Bahnen zerstört worden waren. Der Kortikospinaltrakt überträgt also die konditionierenden Signale zu den Vorderhornzellen. Der nach einem kortikalen Einzelreiz in der Pyramidenbahn registrierbare Anteil der konditionierenden Signale entspricht den D- und I-Waves (Amassian et al. 1987, Kernell and Wu 1967), die den monosynaptischen frühen Anteil der einzelnen compound-EPSP und des Pool-EPSP die frühe Ia-Reflexbahnung, das MEP und möglicherweise auch das IPSP und die Reflexhemmung erzeugen. Der spätere Anteil des compound-EPSP und des Pool-EPSP als Voraussetzung der späten Bahnung setzt einen länger dauernden Erregungszustrom zu den Motoneuronen voraus, der nicht im Poststimulusneurogramm der Pyramidenbahn nachweisbar ist.

D- und I-Waves repräsentieren nur die gruppierte Aktivität schnell leitender Fasern, also nur 10% des pyramidalen Faserspektrums. Die restlichen 90% lassen sich wegen des geringen Durchmessers der beteiligten Fasern als Komponenten des Volumenleiters im Sammelpotential nicht nachweisen,

obwohl der kortikale elektrische Reiz ausreicht auch langsam leitende Pyramidenbahnneurone zu aktivieren (Amassian et al. 1987). Das Summenpotential der Pyramidenbahn gleicht damit dem Summenpotential sensibler Nerven, das auch nur den A $\alpha$  und A $\beta$ -Anteil (>35 m/s) und nicht den A $\delta$ - und c-Faseranteil (< 35 m/s) enthält. Unter der begründeten Voraussetzung, dass die kortikale Reizwirkung die Aktivierung der Fasern unterschiedlicher Leitgeschwindigkeiten mit einschließt, ist ein langdauernder, durch die Streuung der spinalen Erregungsankunftszeiten bedingter Erregungseinstrom als Voraussetzung der späten Phase des compound-EPSP und der spinalen Bahnung durchaus wahrscheinlich. Jeder Abschnitt der Bahnungskurve repräsentiert damit die unterschwellig bahnende Wirkung einer Fraktion des Faserspektrums. Dessen kennzeichnenden Merkmale – Faserdurchmesser und Leitgeschwindigkeit – lassen sich aus Bahnungszeitpunkt und dem Abstand des gebahnten Segmentes vom Kortex ableiten.

Betrachtet man als markante Punkte der Bahnungskurve den frühen Peak als Wirkmal der schnell leitenden Fasern, den späten Peak und den Endpunkt als Wirkmanifestation der Spektrumkomponenten langsamer Leitgeschwindigkeiten, so resultiert der zeitliche Abstand zwischen diesen Wirkmalen aus den unterschiedlichen Ankunftszeiten der erregenden Volleys. Mit zunehmendem Abstand des gebahnten Segmentes vom kortikalen Reizort sollte der zeitliche Abstand des späten Peaks und des Endpunktes vom frühen Peak sich vergrößern, die Bahnungsdauer sich verlängern. Dies ist wie Abb. 4.10 und 4.11 und Tab. 4.7 zeigen, tatsächlich der Fall. Die aus Tab. 4.1 und 4.2 nach der Formel  $\Delta t_m = s (1/c_{p1} - 1/c_{p2})^1$  aus den  $c_p$  der oberen Extremität berechneten Erwartungswerte für die  $\Delta t_m$  der unteren Extremität (Gastrocnemius/soleus, bzw. flexor hallucis longus) liegen über den gemessenen, da die den späten Peak bildenden Leitgeschwindigkeiten in der unteren Extremität etwas über den Werten der oberen Extremität liegen. Bei Bahnungskurven mit gleichen  $c_p$  entspricht der Erwartungswert dem gemessenen Wert der  $\Delta t_p$  (Abb. 4.10 und 4.11).

---

<sup>1</sup> s = Abstand vom Reizort;  $c_{p1}$  = peakbildende c des späten Gipfels;  $c_{p2}$  = peakbildende c des frühen Gipfels.

Interpretiert man den späten Peak als das Ergebnis interneuronaler segmentaler Leitungsverzögerung  $t_{\text{segm}}$  des kortikospinalen Volleys, das bei monosynaptischer Wirkung den 1. Peak produziert (Preston and Whitlock 1963, Day 1987a + b, 1989), so ergibt sich für die jeweiligen wahren ( $c_{p1}$ ) und falschen Leitgeschwindigkeiten ( $c_{p2}$ ):

$$c_{p1[\text{OE}]} = s_0 / \text{CCT}_{p1[\text{OE}]}$$

$$c_{p2[\text{OE}]} = s_0 / \text{CCT}_{p2[\text{OE}]}$$

$$c_{p1[\text{UE}]} = s_0 / \text{CCT}_{p1[\text{UE}]}$$

$$c_{p2[\text{UE}]} = s_0 / \text{CCT}_{p2[\text{UE}]}$$

$$\text{CCT}_{p2} = \text{CCT}_{p1} + t_{\text{segm}}$$

$$c_{p1[\text{OE}]} / c_{p2[\text{OE}]} = 1 + t_{\text{segm}} / \text{CCT}_{p1[\text{OE}]}$$

$$c_{p1[\text{UE}]} / c_{p2[\text{UE}]} = 1 + t_{\text{segm}} / \text{CCT}_{p1[\text{UE}]}$$

Da  $\text{cct}_{p1[\text{OE}]} < \text{cct}_{p1[\text{UE}]}$  muss der Quotient  $c_{p1}/c_{p2}$  der oberen Extremität bei oben und unten gleicher segmentaler interneuronaler Verzögerung größer sein als derjenige der unteren Extremität. Die empirisch bestimmten Quotienten  $c_{p1}/c_{p2}$  betragen 1,9 (oben)  $\approx$  1,8 (unten) (Tab. 4.6).

Die Verzögerung des kortiko-spinalen Volleys, die den späten Peak bedingt, muss also im Lumbosakralmark größer sein als im Zervikalmark. Dies ist gewährleistet, wenn man unterschiedliche Leitgeschwindigkeiten des kortikospinalen Inputs als Ursache später Peakbildung annimmt. Der Quotient der Peak-bildenden Geschwindigkeiten von 1,8 würde eine Verzögerung von 15,5 msec erfordern. Gemessen wurden 14 msec (Tab. 4.6)

Wie oben erwähnt, resultiere nach Preston und Whitlock (1960) die triphasische oder biphasische Bahnungskurve aus der Subtraktion des spinalen Pool-IPSP vom Pool-EPSP. Positiver Saldo bewirke Bahnung, negativer Saldo Hemmung des H-Reflexes. Ein bis zu einem späten Gipfel leicht ansteigender oder nach initialem Anstieg Plateau-bildendes Pool-EPSP werde durch ein rasch ansteigendes IPSP derart moduliert, dass eine zweigipfelige Bahnungskurve mit intermodalem Minimum entstehe. Eine bimodale Verteilung des pyramidalen Faserspektrums analog zur bimodalen Verteilung der A $\beta$  und A $\delta$ -Komponente sensibler Nerven gibt es nicht. Vielmehr nimmt in der Pyramidenbahn die Faserzahl mit dem Faserdurchmesser monoton ab

(Lassek 1948).

Bildet man die Produkte aus Faserzahl  $N$  und Faserquerschnitt  $Q = \frac{d^2 \pi}{4}$  und setzt den so erhaltenen Wert der dünnsten Fasern ( $d = 1 \mu\text{m}$ ) als 1 (keine Verstärkung;  $m = 1$ ), so ergeben sich auf der Basis der Beziehung  $c = 5 * d$  überzeugende Übereinstimmungen zwischen der so gewonnenen und unseren empirischen Verteilungen. Insbesondere stimmen die Lage der Maxima und des intermodalen Minimums überein.

$N$	$c[\text{m/sec}]$	$d [\mu\text{m}]$	$Q [\frac{3}{4}d^2]$	$N \cdot Q$	$\frac{N \cdot Q(m_{ber})}{N \cdot Q_{min}}$	$m (\text{Abb.5})$	$\frac{m(\text{Abb.5})}{m_{ber}}$
7000	5	1	$\frac{3}{4}$	5250	1	1	
3200	10	2	3	9600	1,8	3,1	1,7
1800	15	3	6,75	12150	2,3 ( $p_1$ )	5 ( $p_1$ )	2,17
600	20	4	12	7200	1,37 (ImM)	3,1 (ImM)	2,26
500	25	5	18,75	9675	1,79	4	2,2
400	30	6	27	10800	2,06	4,1 } $p_2$	2,0
300	35	7	36,75	11025	2,1		
200	40	8	48	9600	1,8	1,75	1
100	45	9	60,75	6075	1,16	1,6	1,37

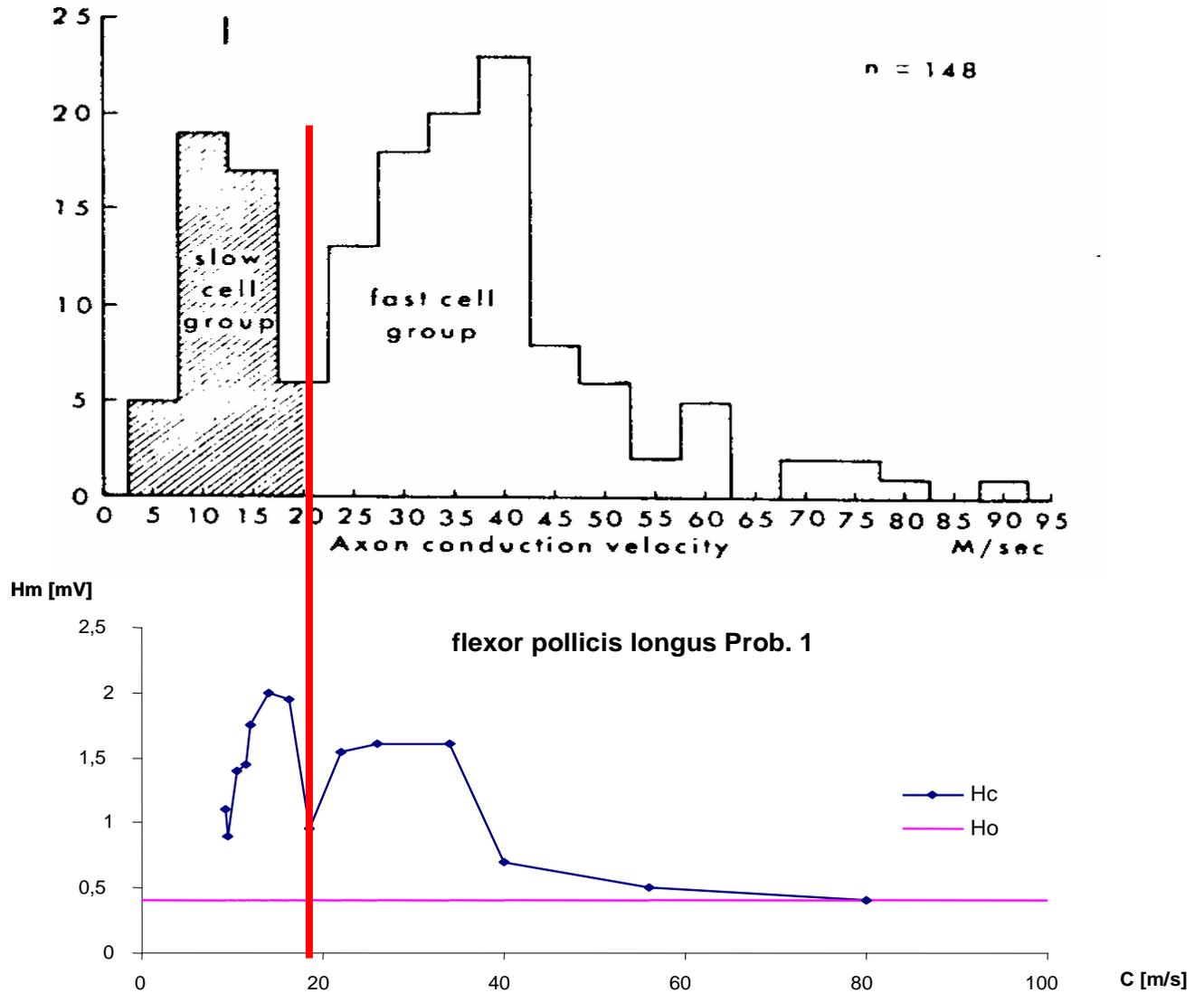
**Tab. 5.1**

Die Werte für  $N$  und  $d$  wurden aus Lassek 1948, Abb. 1 gewonnen.  $P_1$  = erster Peak;  $P_2$  = zweiter Peak; ImM = Intermode-Minimum.

Das Produkt  $N \cdot Q$  bildet den Anteil am Gesamtquerschnitt der Pyramidenbahn, den eine Komponente des pyramidalen Spektrums einnimmt. Dieser relative Anteil bestimmt die Bahnungsstärke der Komponente. Die Tatsache, dass sowohl Faserzahl als auch Faserdurchmesser

einer Komponente die Bahnungsstärke bestimmen, lässt vermuten, dass die Zahl der Kontaktstellen (boutoux terminaux) einer Faser mit dem spinalen Motoneuron der Faserdicke proportional ist.

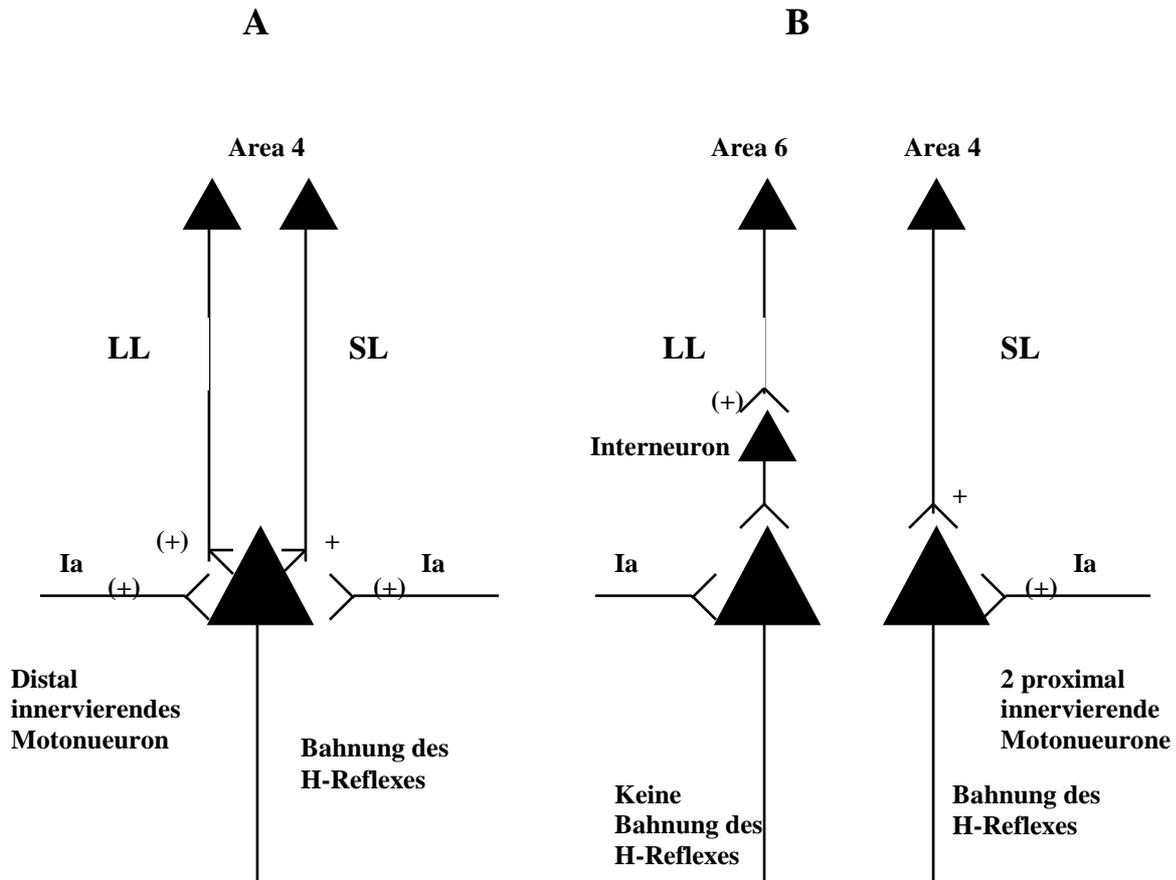
Auch der Quotient  $c_{p1}/c_{im}$  kann zur Klärung beitragen. Im Fall eines interneuronal vermittelten, und zervikal und lumbosakral gleich verzögerten IPSP als Ursache des intermodalen Minimums, müsste der Quotient an der oberen Extremität größer sein als an der unteren. Die zervikal (1,33) und lumbosakral (1,34) fast gleichen Quotienten sprechen für eine leitgeschwindigkeitsbedingte Verzögerung auch im Fall des intermodalen Minimums. Die lumbosakral und zervikal unterschiedlich verzögerten Minima sind in Abb. 4.10 und Abb. 4.11 Mitte und unten exemplarisch dargestellt. Neben der Hemmkomponente der konditionierenden kortikalen Reizantwort wirkt offensichtlich vor allem auch die Parameterverteilung des konditionierenden pyramidalen Faserinputs formgestaltend auf die Bahnungskurve. Deshalb ergibt sich auch eine eindeutige Kongruenz, insbesondere des intermodalen Minimums zwischen Leitgeschwindigkeitsverteilung der PBN der Katze und einer Bahnungskurve (Abb. 5.1).



**Abb 5.1:**

Gegenüberstellung der Leitgeschwindigkeitsverteilung der PBN der Katze und unserer Ergebnisse, beispielhaft dargestellt anhand der errechneten Verteilung beim M. fl.p.l. des Prob.1. Der rote Balken kennzeichnet die sich entsprechenden Minima.

Die biphasische monomodale Bahnungskurve proximaler Antischwerkraftsmuskeln erklären Preston und Whitlock mit der Überwiegenden Hemmwirkung der konditionierenden kortikalen Reizantwort, die die erregende Wirkung negativ saldiert. Das Fehlen des späten Bahnungssegments könnte aber auch durch eine schwach ausgeprägte oder fehlende konditionierende Erregung bedingt sein. Kuypers et al. (1959) hatten gezeigt, dass die spinalen Motoneurone der rumpfnahen Extremitätenmuskulatur nur zum geringen Teil monosynaptisch aus Area 4, vorwiegend aber di- und trisynaptisch aus Area 6 unter Zwischenschaltung in der *Formatio reticularis* und segmental in Interneuronen zentral innerviert werden. Möglicherweise liefern die monosynaptische Innervation nur die schnell leitenden Fasern, die interneuronal vermittelte Innervation vorwiegend die langsamen Fasern. Diese erregen Interneurone nur unterschwellig und können so zur Bahnung des H-Reflexes am Motoneuron nicht beitragen. Die folgenden Schemata sollen unsere Vorstellungen über die kortikospinale Innervation proximal und distal innervierender Motoneurone veranschaulichen.



**Abb. 5.2**

Hypothetische kortikospinale Verbindungen distal (A) und proximal (B) innervierender Motoneurone. Die distal innervierenden Motoneurone werden durch schnell leitende (SL) und langsam leitende (LL) Fasern überschwellig [+] und unterschwellig [(+)] depolarisiert. Die konditionierende unterschwellige Depolarisation bahnt unterschwellige Ia-Depolarisation zu einem H-Reflex.

Bei den proximal innervierenden Motoneuronen bahnt nur der schnell leitende monosynaptische Input, da der unterschwellige di- und trisynaptische zentrale langsam leitende Input die Interneurone nicht überwindet.

## VI Zusammenfassung

Nur ein kleiner Bruchteil (10%) der Pyramidenbahnfasern besitzt eine Leitgeschwindigkeit, die größer als  $30 \frac{m}{s}$  ist. Dieser Bruchteil vermittelt die überschwellige Wirkung eines transkraniellen magnetelektrischen Reizes auf spinale Motoneurone, die als Muskelantwort registriert wird. Die unterschwellige Wirkung der durch den transkraniellen Reiz gleichzeitig aktivierten langsamer leitenden Neurone (90%) erzeugt keine Muskelantwort, jedoch eine Bahnung von H-Reflexen. Wenn man wie in der vorliegenden Arbeit das Intervall zwischen konditionierendem Magnetpuls und elektrischem H-Reflexreiz zwischen  $\Delta t = -5$  und  $\Delta t = 35$  msec variiert, so erhält man in der distalen Muskulatur bis zu 35 msec dauernde triphasische Bahnungskurven mit einem frühen und späten Maximum, die durch ein intermodales Minimum getrennt sind. Mit den aus Autopsien gewonnenen Schätzwerten der Abstände zwischen kortikalem Reizort und spinalem Wirkort und dem jeweiligen Intervall zwischen konditionierendem Reiz und Testreiz lassen sich die Geschwindigkeiten der bahnenden Komponenten des Kortikospinaltraktes berechnen. Die Maxima werden durch Komponenten gebildet, die mit  $30 \frac{m}{s}$ , bzw.  $15 \frac{m}{s}$  leiten, die langsamsten Komponenten mit bahnender Wirkung leiten mit  $6 \frac{m}{s}$ .

Im Einklang mit unserer Hypothese, dass die Abszissenwerte der Bahnungskurve den Ankunftszeiten von bahnenden kortikospinalen Erregungen unterschiedlicher Leitgeschwindigkeit entsprechen, nimmt der zeitliche Abstand zwischen den Bahnungsgipfeln, die jeweils durch Komponenten gleicher Leitgeschwindigkeiten gebildet werden, und die Dauer der Bahnung an der unteren Extremität im Vergleich zur oberen Extremität zu.

Neben dem Interstimulusintervall bestimmen die Stärken des konditionierenden Magnetreizes und es peripheren Testreizes Schwelle und Ausmaß der Bahnung.

Die triphasische Bahnungskurve mit einem frühen und späten Gipfel und die Gipfel trennenden intermodalen Minimum erhält man nur aus der distalen Muskulatur, wie z.B. am M. flexor carpi radialis oder dem M. flexor hallucis longus. Bei proximalen Antischwerkraftsmuskeln, wie dem M. biceps brachii oder dem M. quadriceps, bricht die Bahnung nach dem ersten frühen Gipfel ab, um in eine Phase normaler oder gehemmter H-Reflex Erregbarkeit überzugehen. Eine durch den Magnetreiz gleichzeitig aktivierte, überwiegend spinale, Hemmkomponente oder vorwiegend disynaptische kortikomotoneuronale Verbindungen langsam leitender Pyramidenbahnfasern, die für eine direkte bahnende Interaktion mit der Ia-Afferenz am Motoneuron nicht zur Verfügung stehen, können als Erklärung der diphasischen Bahnungskurven proximaler Muskeln dienen.

Die summierende Interaktion des peripheren und zentralen Inputs am Motoneuron lässt sich durch Modelle analytisch simulieren. Aus diesen Modellen gewinnt man auch Näherungen der empirischen Beziehungen zwischen Verstärkungswirkungen und Reizstärken. Triphasische Bahnungskurven mit zwei Maxima und intermodalem Minimum erhält man, wenn man das Produkt aus Faserzahl und Faserquerschnitt, d.h. den Anteil einer bestimmten Leitgeschwindigkeitskomponente am Gesamtquerschnitt der Pyramidenbahn, über der Leitgeschwindigkeit verteilt. Die so erhaltenen Verteilungen gleichen den empirischen Verteilungen der Bahnungsstärken. Faserzahl und auch Faserdurchmesser einer Komponente des Pyramidenbahnspektrums bestimmen also ihre Bahnungsstärke.