

Monitoring in der Anästhesie

Überwachung der neuromuskulären Blockade – Methoden und Geräte

Dirk Nauheimer • Götz Geldner



Der Einsatz von Muskelrelaxanzien erleichtert die Intubation, vermindert das Auftreten von Heiserkeit und Stimmband-schäden, verbessert die Operationsbedingungen und ist daher aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenken. Jedoch kann nicht exakt vorhergesagt werden, welche Dosis eines Muskelrelaxans wann anschlägt und wie lang anhält, da dies von individuellen Faktoren wie Begleiterkrankungen und Wechselwirkungen abhängt. Um Restblockaden zu vermeiden, ist neuromuskuläres Monitoring unabdingbar. Hierfür stehen qualitative und quantitative Verfahren zur Verfügung, die im folgenden Beitrag vorgestellt werden.

Physiologische Grundlagen der Relaxierung

▼
Neuromuskuläre Übertragung: Vom Nerv zum Muskel Die neuromuskuläre Übertragung wandelt an den motorischen Endplatten der Muskelfasern Aktionspotenziale der motorischen Nerven in Aktionspotenziale der Muskelzelle um. Acetylcholin (ACh) wird dazu aus den Vesikeln der präsynaptischen Membran

der Nervenzelle freigesetzt. Es überwindet den 15–30 nm breiten synaptischen Spalt und führt an den postsynaptischen nikotinergen ACh-Rezeptoren (ligandengesteuerte Ionenkanäle)

► zu einer Permeabilitätsänderung der querestreiften Muskelzelle für Kationen (Na^+ , K^+) und somit

► zur Änderung des Endplattenpotenzials.

Eine Depolarisation und die daraufhin folgende Kontraktion der Muskelzelle erfolgt nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip: Sofern eine hinreichende Anzahl an Rezeptoren gleichzeitig aktiviert und das Schwellenpotenzial (40–60 mV) überschritten wird, öffnen sich spannungsabhängige Na^+ - und Ca^{2+} -Kanäle, und das Aktionspotenzial breitet sich mit etwa 5 m/s über die Muskelfasermembran aus (► Abb. 1).

Die elektromechanische Kopplung erfolgt durch die Freisetzung von Ca^{2+} -Ionen aus dem transversalen System und leitet durch eine intrazelluläre Konzentrationserhöhung die Muskelkontraktion ein.

- Abb. 1** Schematische Darstellung der neuromuskulären Endplatte. ACh: Acetylcholin.
- 1 eintreffendes Aktionspotenzial am Axonende
 - 2 Depolarisation des Axonendes durch Na^+ - und Ca^{2+} -Einstrom
 - 3 Verschmelzung der ACh-Vesikel mit der präsynaptischen Membran
 - 4 Diffusion der ACh-Moleküle durch den synaptischen Spalt und Aktivierung der postsynaptischen ligandengesteuerten Ionenkanäle
 - 5 Öffnung der postsynaptischen Ionenkanäle und Einstrom von Na^+ -Ionen.

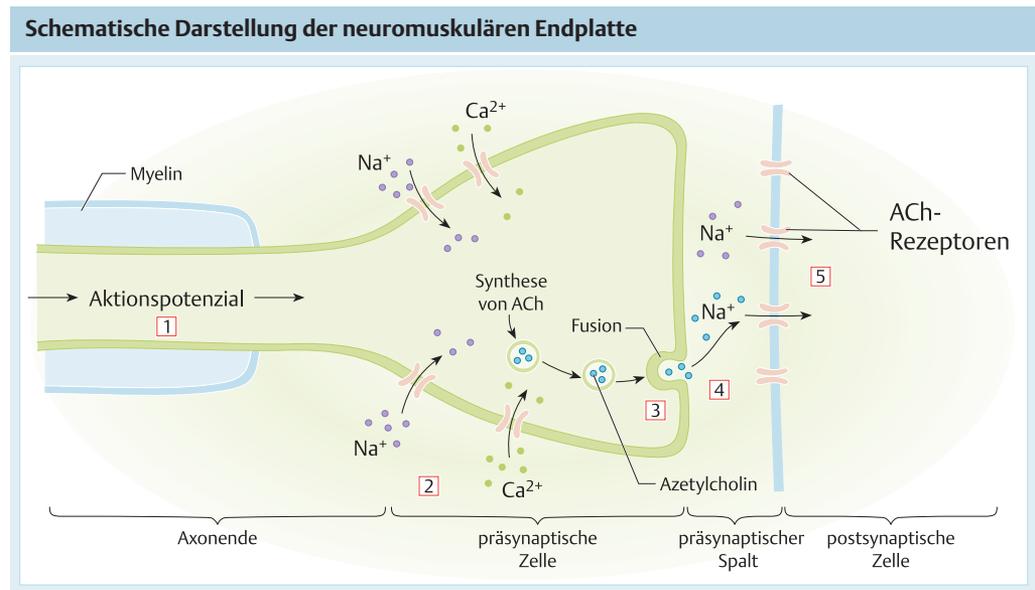


Abb.: A. Wielezko

Vertreter nicht depolarisierender Muskelrelaxanzien			
	Gestern	Heute	Morgen
Benzylisochinoline	d- Tubocurarin Gallamin	Atracurium Cis-Atracurium Mivacurium (Doxacurium)	Trans-Mivacurium GW 280 430 A
Steroide	Pipecuronium	Pancuronium Vecuronium Rocuronium	(ORG 9616) ORG 7617
Isoquinolone Sonstige	Curare (Metocurin) Alcuronium		(ANQ 9040) G-1-64

Tab. 1 nach G. Geldner.

Sicherheitsreserve: vollständige Relaxierung erst bei 90%iger Blockade

Eine Aktivierung von bereits 5–10% der postsynaptischen ACh-Rezeptoren reicht aus, um ein überschwelliges postsynaptisches Aktionspotenzial zu generieren. Die Eigenschaft, dass ein Großteil (> 75%) der ACh-Rezeptoren blockiert sein muss, um klinische Zeichen einer Muskelschwäche zu verursachen, wird als „Sicherheitsreserve“ bezeichnet. Eine vollständige Muskelrelaxierung erfordert eine Blockade von mindestens 90% der postsynaptischen ACh-Rezeptoren. Hieraus ergeben sich unmittelbar klinische Konsequenzen für die neuromuskuläre Erholung, denn bereits bei 25–30% freier ACh-Rezeptoren sind neuromuskuläre Restblockaden nicht mehr zu erfassen. Die Sicherheitsreserve ist in diesem Falle jedoch erschöpft. Somit ist nicht davon auszugehen, dass bei fehlenden klinischen Zeichen einer neuromuskulären Blockade keine Rezeptoren mehr durch Muskelrelaxanzien besetzt sind. Geringe Veränderungen des Verhältnisses von Azetylcholin und Muskelrelaxans an der motorischen Endplatte können erneut zu klinisch manifester Relaxation führen.

Eine vollständige Muskelrelaxierung liegt vor, wenn mindestens 90% der postsynaptischen ACh-Rezeptoren blockiert sind. Bei 25–30% unbesetzter ACh-Rezeptoren ist eine neuromuskuläre Restblockade nicht mehr zu erfassen.

Blockade der neuromuskulären Übertragung

Es gibt 2 Ansätze für die Hemmung der neuromuskulären Übertragung:

1. Blockade der postsynaptischen ACh-Rezeptoren durch kompetitive Antagonisten des Azetylcholins (Nichtdepolarisationsblock). Vertreter sind: Steroidderivate, Toxiferinderivat, Benzylisochinoline (☛ Tab. 1)
2. Blockade des postsynaptischen ACh-Rezeptors durch Auslösung eines Aktionspotenzials, aber langsame Abdiffusion bzw. Abbau und in der Folge Unerregbarkeit der postsynaptischen Membran durch Dauerdepolarisation

(Depolarisationsblock). Vertreter ist: Suxamethonium (☛ Tab. 2)

Muskelrelaxierung: Einleitung



Anschlagzeit und Wirkdauer variieren Die Verwendung von Muskelrelaxanzien im Rahmen der Allgemeinanästhesie dient vorrangig

- ▶ der Verbesserung der Intubationsbedingungen wie auch
- ▶ der Optimierung operativer Bedingungen bei Eingriffen, die eine Relaxierung der quergestreiften Muskulatur erforderlich machen.

Verlässliche Vorhersagen zu Wirkungseintritt, Wirkdauer und Abklingen einer Relaxation sind ohne zuverlässiges Monitoring kaum möglich,

- ▶ da sich Anschlagzeiten, Wirkdauer und Dosierungen der klinisch verwendeten Muskelrelaxanzien unterscheiden und

- ▶ da sich individuelle Einflussfaktoren wie Begleiterkrankungen, Wechselwirkungen und synergistische Arzneimittelwirkungen auf die neuromuskuläre Blockade auswirken [1].

Die in der Literatur angegebenen Wirkzeiten geben Mittelwerte wieder, die in Studien unter definierten Bedingungen an meist kleineren Patientenkollektiven der ASA-Klassen I und II ermittelt worden sind. Daher stellen diese Angaben nur Richtwerte dar, die im Einzelfall erhebliche Abweichungen aufweisen können.

Monitoring der neuromuskulären Blockade fehlt häufig

Die Überwachung des neuromuskulären Blocks ist notwendig, um

- ▶ den Relaxanzienbedarf individuell an den Patienten anzupassen und
 - ▶ sowohl optimale Operationsbedingungen zu gewährleisten als auch
 - ▶ die Wirkdauer möglichst präzise zu begrenzen.
- Eine 2003 veröffentlichte Umfrage zur Verwendung des neuromuskulären Monitorings an deutschen Anästhesieabteilungen zeigte, dass
- ▶ neuromuskuläre Funktionen in lediglich 28% der befragten Einrichtungen regelmäßig überwacht werden und

Tab. 2 nach G. Geldner.

Klinisch übliche Muskelrelaxanzien und ihre Dosierung				
	Intubationsdosis mg/kg	Repetitionsdosis mg/kg	Wirkdauer (Inj.-25%) min	Erholungsindex (25–75% Erholung) min
Succinylcholin	1,0		ca. 7–12	ca. 4
Rocuronium	0,6	0,1	ca. 40	ca. 14
Pancuronium	0,1	0,015	ca. 120	ca. 40
Vecuronium	0,1	0,02–0,05	ca. 40	ca. 15
Cis-Atracurium	0,1	0,02	ca. 45	ca. 15
Atracurium	0,3–0,5	0,1–0,2	ca. 40	ca. 15
Mivacurium	0,15	0,05–0,1	ca. 20	ca. 7

- ▶ 33% die Verwendung eines Nervenstimulators nicht für notwendig halten [2].
- Es sollte daher auch nicht verwundern, dass Untersuchungen an Patienten im Aufwachraum in über 30% der Fälle erhebliche neuromuskuläre Restblockaden aufdeckten [3].

Bei zirka 30% der Patienten im Aufwachraum sind Restblockaden vorhanden. Neuromuskuläres Monitoring wird in nur 28% der deutschen Kliniken intraoperativ regelmäßig angewendet.

Auswirkungen von Restblockaden Klinische Konsequenzen, die sich aus verschiedenen Graden von Restblockaden ergeben können, äußern sich vor allem in hypoxischen Komplikationen (▶ Tab. 3). Bereits bei geringen Restblockaden lassen sich nachweisen:

- ▶ Beeinträchtigung der forcierten Vitalkapazität
- ▶ Obstruktion der oberen Atemwege
- ▶ Störungen der pharyngealen Funktionen und
- ▶ Einschränkung der hypoxischen Atemantwort [4, 5].

Ausreichende Relaxierung vor Intubation Im Rahmen von Routine-Narkoseeinleitungen wird üblicherweise die 2–3-fache ED95-Dosis verwendet. Wie Untersuchungen belegen, nehmen bei fehlender oder nicht ausreichender Muskelrelaxierung zur Intubation

- ▶ postoperative Heiserkeit sowie
 - ▶ Stimmbandschäden
- in 40% der Fälle zu [5, 6]. Laryngeale Schädigungen hängen unmittelbar mit der Qualität der

endotrachealen Intubation zusammen. Idealerweise wird bei ausreichender Narkosetiefe unter Maskenbeatmung und neuromuskulärem Monitoring die volle Ausprägung der Relaxierung abgewartet, bevor die endotracheale Intubation vollzogen wird.

Neuromuskuläres Monitoring: qualitativ und quantitativ Grundsätzlich unterscheidet man qualitatives und quantitatives neuromuskuläres Monitoring. Während beim qualitativen Monitoring die Reizantwort subjektiv abgeschätzt wird, kann bei quantitativen Verfahren die Reizantwort objektiv gemessen werden.

Qualitatives (subjektives) Monitoring

Visuelle oder taktile Einschätzung Zur klinischen Einschätzung einer muskulären Relaxierung können einfache Tests wie auch visuelle oder taktile Beurteilungen einer Reizantwort nach Stimulierung peripherer Nerven herangezogen werden.

Klinische Zeichen der Relaxierung Zur Beurteilung der neuromuskulären Erholung werden häufig klinische Zeichen herangezogen. Die Durchführung einfacher Aufgaben erfordert einen wachen Patienten sowie ein gewisses Maß an Kooperation, was sich im Rahmen von Allgemeinanästhesien häufig als schwierig erweist. Als klinische Zeichen einer noch ausgeprägten neuromuskulären Restblockade sind

- ▶ Schaukelatmung oder

Tab. 3 Quantifizierung klinisch relevanter Konsequenzen partieller neuromuskulärer Blockaden anhand der TOF-Ratio des M. adductor pollicis [mod. nach 4, 22, 23].

Klinische Auswirkung der partiellen neuromuskulären Blockade					
TOF-Ratio	Tidalvolumen	forcierte Vitalkapazität (FVC)	pharyngeale Funktion	Integrität oberer Atemweg	hypoxische Atemantwort
0,5	reduziert – normal	reduziert	reduziert	sicher eingeschränkt	eingeschränkt
0,8	normal	reduziert – normal	reduziert	eingeschränkt	eingeschränkt – normal
1,0	normal	normal	normal	normal	normal

- ▶ ruckartige, unkontrollierte Bewegungen der Extremitäten zu interpretieren.

Das Anheben des Kopfes oder einer Extremität für etwa 5 s galt längere Zeit als zuverlässiges Zeichen einer neuromuskulären Erholung [7]. Mit Einzug der Train-of-four-Stimulation (TOF-Stimulation) und vergleichenden Untersuchungen konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Tests

- ▶ bereits bei einer TOF-Ratio von 0,5 auszuführen sind und
- ▶ neuromuskuläre Restblockaden keinesfalls zuverlässig erkennen.

Auch die Verlängerung des Intervalls von 5 s auf 10 s kann die Aussagekraft nicht weiter steigern.

Zungen-Spatel-Test Ein sensibleres Verfahren zur klinischen Beurteilung ist der Zungen-Spatel-Test. Der Patient wird aufgefordert, mit den Schneidezähnen auf einen Zungenspatel zu beißen, während der Untersucher den Spatel zurückzieht. Zur Ausführung ist eine TOF-Ratio von 0,8 nötig. Limitiert wird dieser Test jedoch durch

- ▶ intubierte Patienten,
- ▶ die hohe Wahrscheinlichkeit für Zahnschäden und
- ▶ das Risiko von Würgereiz oder Erbrechen [8].

Reizantwort nach Nervenstimulation Die am häufigsten durchgeführte Methode zur Beurteilung des Relaxierungsgrades ist die visuelle oder taktile Beurteilung der Reizantwort des M. adductor pollicis nach Stimulierung des N. ulnaris. Zur Anwendung werden die Stimulationselektroden (rot – Anode; schwarz – Kathode) entsprechend am distalen Unterarm appliziert (▶ Abb. 2). Üblich ist ein Stromfluss von der Anode (+) in Richtung der Kathode (-).

Auch die Reizantworten

- ▶ des M. corrugator supercilii oder
- ▶ des M. orbicularis oculi, der hinsichtlich Wirkungseintritt und Sensibilität am besten mit der Larynx- und Zwerchfellmuskulatur korreliert,

können zur subjektiven Beurteilung herangezogen werden (▶ Abb. 3) [9].

Zur klinischen Auswertung von Reizantworten nach Nervenstimulationen lassen sich verschiedene Reizmuster, wie TOF-, Double-Burst- oder tetanische Stimulationen anwenden. Vor dem Hintergrund

- ▶ der Komplikationen bei minimalen neuromuskulären Restblockaden und
- ▶ der limitierten Aussagekraft für eine zuverlässige neuromuskuläre Erholung sollten zur Überwachung quantitative Methoden eingesetzt werden.



Abb.: D. Nauheimer

Zur qualitativen (taktilen, visuellen) Beurteilung des Relaxierungsgrades stehen verschiedene klinische Tests (Anheben der Extremitäten oder des Kopfes, Zunge-Spatel-Test) wie auch unterschiedliche Stimulationsmuster (TOF, DBS, Tetanus) zur Verfügung. Eine zuverlässige Erfassung von Restblockaden ist aber nicht möglich.

Quantitatives (objektives) Monitoring

TOF: Train-of-four Um den Relaxierungsgrad einer neuromuskulären Blockade am zuverlässigsten wiederzugeben, eignen sich quantitative Messmethoden. Neben den verschiedenen Messverfahren haben sich auch unterschiedliche Möglichkeiten der Nervenstimulation hinsichtlich des Reizmusters etabliert.

Am besten eignet sich die Registrierung der TOF-Reizantwort. Hierbei werden Elektroden über dem zu stimulierenden Nerv angebracht, worüber ein monophasischer Rechteckimpuls von 0,1–0,2 ms Dauer ausgelöst wird (Single Twitch Stimulation). Das TOF-Reizmuster entspricht 4 dieser Einzelreize mit einer Frequenz von 0,5 Hz. Der Stimulus sollte supramaximal erfolgen, d. h. 20% über der Stromstärke mit maximaler Reizantwort.

- ▶ Für den N. ulnaris liegt dieser bei zumeist 60–80 mA,
- ▶ für den N. facialis bei etwa 30–40 mA [10].

Abb. 3

- N. facialis mit Reizantwort des M. orbicularis oculi.
- N. ulnaris mit Reizantwort des M. adductor pollicis.

Darstellung möglicher Stimulationsorte

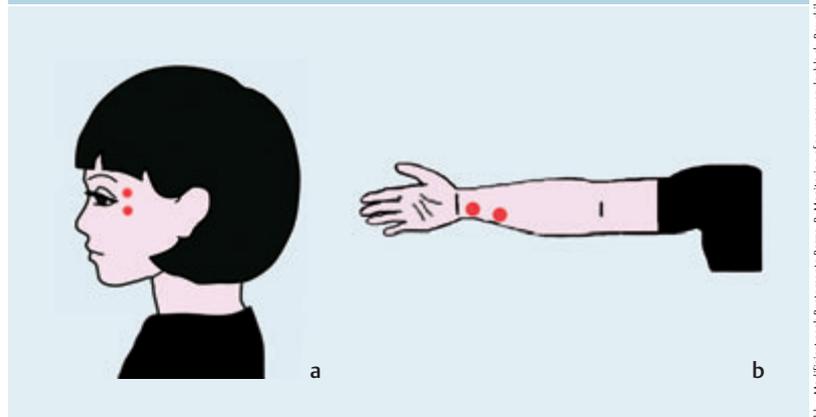


Abb.: Modifiziert nach Bestamante-Bozzo, R. Monitoring of neuromuscular block. Rev. Chil. Anest. 2004;33:49–70

TOF-Stimulationsmuster

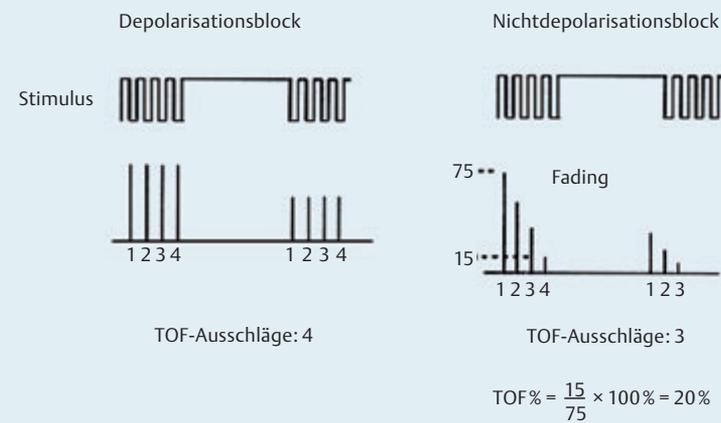


Abb.: Modifiziert nach Datec Ohmeda, Neuro Muscular Transmission: NMT-Quick Guide

Abb. 4 TOF-Stimulationsmuster bei Depolarisations- und Nichtdepolarisationsblockade.

TOF: Fading Eine Abnahme der muskulären Reizantwort vom ersten bis zum vierten Reiz deutet auf eine vorhandene Restblockade hin und wird als „Fading“ bezeichnet.

- ▶ Eine einzige wahrnehmbare Reizantwort auf die 4 Impulse entspricht einer neuromuskulären Blockade von etwa 90%,
- ▶ 2 von 4 Reizantworten einer Blockade von 75–80%.

Ein durch Succinylcholin bedingter Depolarisationsblock hingegen gibt kein Fading wieder. Hier werden alle 4 Reizantworten vermindert, aber gleich stark wiedergegeben.

Bei Stimulationsfrequenzen über 0,1 Hz ist eine Abnahme der muskulären Antwort zu beobachten, sodass die Stimulationen erst nach einem Intervall von mindestens 12s wieder erfolgen sollten.

TOF-Ratio Der TOF-Quotient (TOF-Ratio) beschreibt das Verhältnis der vierten zur ersten Reizantwort (T_4/T_1 -Ratio) und quantifiziert das Ausmaß einer partiellen neuromuskulären Blockade (▶ Abb. 4).

Ein TOF-Quotient von 0,7 wurde lange als Indikator für eine ausreichende muskuläre Erholung angesehen, ist aber nach aktuellen Untersuchungen infrage zu stellen. Um eine ausreichende Erholung vor dem Hintergrund schwerwiegender pathophysiologischer Konsequenzen sicherzustellen, sollte zur Extubation

- ▶ ein TOF-Quotient von 0,9 angestrebt werden [5].

Selbst minimale Restblockaden erhöhen bei einem TOF-Quotienten von 0,8 durch Dysfunktion der oberen Atemwege sowie durch Einschränkungen der pharyngealen Funktionen

- ▶ das Aspirationsrisiko und
- ▶ können zu hypoxischen Komplikationen führen.

Die taktile Erfassung einer muskulären Ermüdung mithilfe der TOF-Stimulation ist jedoch nur bis zu einem TOF-Quotienten von etwa 0,4 möglich. Bei geringeren Restblockaden (TOF-Quotient > 0,5) werden die 4 evozierten Muskelkontraktionen als gleich stark empfunden, trotz vorhandener partieller neuromuskulärer Blockade [11]. Ein zuverlässiges Erkennen von Restblockaden am Operationsende ist somit nicht möglich.

Um Komplikationen durch neuromuskuläre Restblockaden zu vermeiden, sollte zur Extubation ein TOF-Quotient von mindestens 0,9 angestrebt werden. Klinische Tests können geringe Restblockaden nicht erfassen. Hierfür sind quantitative Messmethoden notwendig.

DBS: Double-Burst-Stimulation Ende der 1980er-Jahre war es Ziel der Arbeitsgruppe um Viby-Mogensen, eine Stimulationsform zu entwickeln, die eine zuverlässigere taktile oder visuelle Beurteilung der neuromuskulären Erholung als die TOF-Stimulation bietet [12]. Die DBS entspricht einem Reizmuster von 2 Reizserien à 3 Stimuli von 0,2 ms Dauer und einer Frequenz von 50 Hz mit einem Intervall von 750 ms (▶ Abb. 5). Daher entstammt die gebräuchliche Bezeichnung „DBS_{3,3}“.

DBS: Fading zuverlässiger als bei TOF Der Mindestabstand zwischen Doppelsalvenstimulationen sollte mindestens 15s betragen, um ähnlich wie bei der TOF-Stimulation eine Abnahme der Reizantwort durch zu hohe Stimulationsfrequenzen zu vermeiden. Ein Fading wird zuverlässiger erfasst als mithilfe der TOF-Stimulation, da durch tetanische Stimulierungen Ermüdungsreaktionen verstärkt werden [13]. Die taktile Erfassung der DBS kann die Inzidenz postoperativer Restblockaden im Vergleich zur TOF-Stimulation zwar senken, ist zum Abschluss von Restblockaden aber dennoch nicht geeignet und sollte durch quantitative Methoden ergänzt werden.

Das Stimulationsverfahren DBS erkennt bei visueller oder taktile Erfassung neuromuskuläre Restblockaden am Operationsende besser als die TOF-Stimulation.

Abb. 5 DBS-Reizmuster.

DBS-Reizmuster

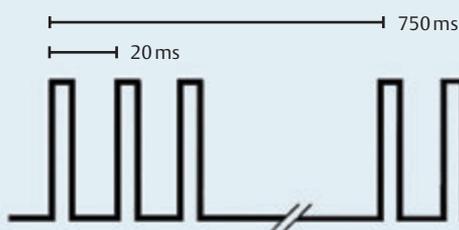


Abb.: Modifiziert nach Bustamante Bozzo, R. Monitoring of neuromuscular block. Rev chil Anest. 2004;33:49-70

Tetanus Da die durch nervale Reizung ausgelösten Muskelaktionspotenziale wesentlich kürzer als die Muskelkontraktionen sind, ist eine erneute Aktivierung der kontraktile Elemente schon während einer Kontraktion möglich. Einzelne evozierte Muskelkontraktionen verschmelzen bei Stimulationsfrequenzen > 5 Hz zur Dauerkontraktion (Tetanus), da der Muskel zwischen den einzelnen Stimulationen nicht mehr in seine Ruhelage zurückkehrt. Die Fusionsfrequenz einzelner Kontraktionen zum Tetanus liegt etwa zwischen 20 und 250 Hz. Um neuromuskuläre Restblockaden zuverlässiger zu erfassen, eignen sich tetanische Stimulationsmuster > 50 Hz für 5–10 s, da sie eine Ermüdungsreaktion verstärken. Bei Stimulationen > 200 Hz lässt sich ein Fading auch ohne Muskelrelaxation beobachten, was zu falsch positiven Beobachtungen führen kann.

Post-tetanic Count Zur Beurteilung einer tiefen neuromuskulären Blockade, bei der keine TOF-Reizantworten mehr wahrnehmbar sind, eignet sich der Post-tetanic Count. Diese Methode entwickelte sich vor dem Hintergrund der posttetanischen Potenzierung. Nach Injektion eines nicht depolarisierenden Muskelrelaxans wird die Kontraktionsamplitude nach Einzelreizstimulierung vor und im Anschluss an tetanische Reizmuster gemessen. So lassen sich Veränderungen der Kontraktionsamplitude dokumentieren. Durch die tetanische Stimulierung ändert sich das Verhältnis von Acetylcholin und Muskelrelaxans zugunsten des Acetylcholins im synaptischen Spalt an der muskulären Endplatte. Da eine kompetitive Hemmung der nikotinergen Acetylcholinrezeptoren durch das Muskelrelaxans vorliegt, werden durch das Mehrangebot an Acetylcholin mehr muskuläre Einheiten rekrutiert. Zudem führt eine Erhöhung der zytosmatischen Ca^{2+} -Konzentration durch vermehrte Freisetzung bei kurzen Erregungsintervallen zu einer Steigerung der Kontraktionskraft. Dies stellt sich bei der anschließenden Messung nach Einzelreizstimulierung als erhöhte Kontraktionsamplitude im Vergleich zur prä-tetanischen Kontraktionsamplitude dar. Diese Verstärkung der evozierten Muskelkontraktion lässt sich für etwa 1–2 min im Anschluss an eine tetanische Stimulierung messen. Um den Post-tetanic Count zu bestimmen, werden bei tiefer Muskelrelaxation nach tetanischer Stimulierung Einzelreize mit einer Frequenz von 1 Hz appliziert, bis erneut eine Muskelkontraktion wahrnehmbar wird.

Quantitatives Monitoring erkennt Restblockaden Die Aussagekraft des qualitativen Monitorings ist vergleichbar mit jener der quantitativen Verfahren hinsichtlich

- ▶ Erfassung des Intubationszeitpunktes und
- ▶ perioperativer Nachinjektion.

Die Intubation sollte möglichst dann erfolgen, wenn subjektiv keine Reizantwort mehr wahrnehmbar ist. Bei chirurgischen Eingriffen kann gegebenenfalls eine intraoperative Nachrelaxierung erforderlich werden, wenn 1–2 Reizantworten erfassbar sind. Deutliche Nachteile bezüglich der Aussagekraft ergeben sich jedoch für die subjektive Beurteilung der neuromuskulären Erholung. Zum zuverlässigen Ausschluss von Restblockaden (TOF-Quotient $> 0,6$) ist die Anwendung einer quantitativen Beurteilung unausweichlich.

Die TOF-Stimulation ist die gängigste Methode zur Überwachung der neuromuskulären Blockade. Die Double-Burst-Stimulation ist ein Verfahren, das sich in der klinischen Beurteilung am Operationsende besser als die TOF-Stimulation eignet, um Restrelaxierung zu erkennen. Um sehr tiefe Relaxierungen beurteilen zu können, eignet sich der Post-tetanic Count.

Zwerchfellaktivität trotz neuromuskulärer Blockade Folgende Besonderheiten sollten zudem Erwähnung und Beachtung finden: Da das Zwerchfell und die Larynxmuskulatur größere Sicherheitsreserven als der M. adductor pollicis aufweisen, lassen sich bei ausgeprägter Relaxierung durchaus Muskelkontraktionen wahrnehmen („Pressen“). Verschiedene Studien konnten belegen, dass die periorbitale Muskulatur (M. orbicularis oculi; M. corrugator supercilii) die engste Korrelation zur Zwerchfell-, und Larynxmuskulatur aufweist [9]. Aufgrund der klinischen Praktikabilität haben sich jedoch Messmethoden an peripheren Muskeln durchgesetzt. Es ist somit möglich, dass beim Patienten trotz einer peripher gemessenen kompletten neuromuskulären Blockade Zwerchfellaktivitäten („Pressen“) auftreten.

Einfluss der Körpertemperatur Ein Absinken der Körpertemperatur beeinflusst erheblich die neuromuskuläre Erholung. Diesem Phänomen zugrunde liegen pharmakodynamische Ursachen wie die reduzierte Elimination und verzögerte Abnahme der Plasmakonzentration der Muskelrelaxanzien aufgrund von Verteilungsveränderungen. Eine prolongierte neuromuskuläre Blockade kann somit als Folge von Hypothermie auftreten. Es bietet sich daher an, bei länger andauernden Operationen, zusätzlich zum neuromuskulären Monitoring, die Körperkerntemperatur zu überwachen [14].

Apparate Neben den dargestellten unterschiedlichen Stimulationsmodi stehen zur apparativen Überwachung verschiedene Methoden zur Verfügung.

Geräte und Methoden zur Überwachung der neuromuskulären Blockade

▼
Mechanomyographie (MMG) Geräte hierfür sind: Relaxometer® und Mechanomyograph® (beide im Handel nicht mehr erhältlich).

Die Mechanomyographie misst die Kraft bei Ausübung einer Bewegung nach evozierter Muskelkontraktion. Im Vergleich zu den quantitativen Messmethoden bietet die Mechanomyographie die zuverlässigsten Messergebnisse, erfordert aber eine aufwendigere apparative Vorbereitung. Die Anwendung der MMG konzentriert sich daher primär auf den experimentellen Bereich als Goldstandard oder als Referenz gegenüber anderen Methoden. Der Standardmuskel zur Messung der MMG ist

- ▶ der M. adductor pollicis
- ▶ nach Stimulation des N. ulnaris.

Gemessen wird die Muskelkraft bei supramaximaler Nervenstimulation mit etwa 60–80 mA. Vor Injektion des Muskelrelaxans dient eine Kraftmessung der evozierten Muskelkontraktion als Referenzwert. Um Abweichungen oder Messfehler durch Positionsveränderungen zu vermeiden, sollte idealerweise der Unterarm in einer angepassten Schiene gelagert und der Daumen mit einer Vorspannung von etwa 200 g in der speziellen Messvorrichtung fixiert werden [15]. Ähnliche Methoden zur Kraftmessung bedienen sich eines Ballons, um Druckveränderungen durch Kompression indirekt in die ausgeübte Kraft umzurechnen [16].

Elektromyographie (EMG) Gerät: Relaxograph® (Datex-Ohmeda), EMG-Modul Datex/GE.

Die Elektromyographie ist die älteste Methode des neuromuskulären Monitorings und basiert auf der Messung von summierten Aktionspotentialen der evozierten Muskelkontraktionen. Dieses Monitoringverfahren ist weit verbreitet und kann für viele Muskeln oder Muskelgruppen angewendet werden, wie

- ▶ M. adductor pollicis (Ableitung über dem Thenar),
- ▶ Zwerchfell- und
- ▶ Larynxmuskulatur,
- ▶ M. Corrugator supercilii oder
- ▶ M. orbicularis oculi [9].

Vergleichende Untersuchungen mit Messergebnissen des MMG konnten zufriedenstellende Übereinstimmungen mit dem Elektromyogramm nachweisen [17]. Die Ableitung eines EMG kleinerer Muskeln gestaltet sich aufgrund geringerer Potenziale oft schwierig und führt zu ungenauen Messergebnissen. Technische Probleme bei der EMG-Ableitung führen bei vermeintlich zu hoch gemessener Potenzialstärke häufig zur Unterschätzung des Relaxationsgrades.

Akzeleromyographie (AMG) Geräte sind: TOF-Watch® und TOF-Guard®.

Die Beziehung von Masse und Beschleunigung zur Kraft wird bei der Akzeleromyographie angewandt (2. Newton'sches Gesetz: $F = m \times a$). Hierbei wird die Beschleunigung einer evozierten Muskelkontraktion gemessen. Aufgrund der einfachen Anwendung eignet sich der M. adductor pollicis nach peripherer Ulnaris-Stimulation am besten. Für optimale Messergebnisse und eine gute Korrelation zu den Ergebnissen des MMG und der EMG sollte die Hand oder der Unterarm in einer Schiene gelagert werden, um Positionsveränderungen zu vermeiden. Bei der Anwendung an anderen Muskeln, wie

- ▶ M. corrugator supercilii oder
- ▶ M. orbicularis oculi,

ergeben sich unzuverlässigere Messergebnisse aufgrund der geringeren Bewegungen und folglich auch geringeren Beschleunigungen der evozierten Reizantworten [18]. Unabdingbare Voraussetzung, um auch minimale Restblockaden zu erkennen, ist die Kalibrierung durch eine Referenzmessung vor Injektion des Muskelrelaxans und eine kontinuierliche Überwachung. Eine nur punktuell am Operationsende durchgeführte Messung reduziert die Wahrscheinlichkeit einer sicher ausgeschlossenen Restblockade um etwa 50% [19].

Kinemyographie (KMG) Gerät: NMT® (Modul Datex/GE). Das Verfahren der Kinemyographie misst eine ausgeführte Bewegung nach evozierter Muskelkontraktion. Ein Mechanosensor, der einen piezoelektrischen Streifen enthält, erfasst die Bewegung. Nach Anbringen der elastischen Einheit zwischen Daumen und Zeigefinger und einer dadurch erzeugten Vorspannung wird nach Stimulierung des peripheren N. ulnaris die Adduktionsbewegung des Daumens gemessen. Unzuverlässige Ergebnisse durch Artefakte resultieren bei unzureichender Fixierung des Mechanosensors und Fehllagerungen der Hand. Nach TOF-Stimulierung werden die Messergebnisse durch ein Säulendiagramm und Prozentangaben wiedergegeben.

Phonomyographie (PMG) Die Phonomyographie basiert auf dem Prinzip, mittels eines speziellen Mikrophons Schallwellen niederer Frequenz aufzuzeichnen, die durch Oszillation der kontrahierenden Myofibrillen emittiert werden. Die Signalstärke korreliert hierbei mit der Muskelkraft. Dieses Phänomen wurde 1665 von Grimaldi beschrieben. Die biphasische Schallwellenemission kann an der Hautoberfläche mithilfe spezieller Mikrophone, die sensitiv Frequenzen < 50 Hz erfassen, aufgezeichnet werden. Der messbare Schalldruck korreliert mit der ausgeübten Muskelkraft. Die Vorteile dieses Verfahrens sind

- ▶ seine einfache apparative Anwendung und
- ▶ die Applizierbarkeit auf den gewünschten Muskeln [20].

Messfehler können durch Veränderungen der Position während der Aufzeichnungsphase entstehen.

- ▶ Zuverlässige Messergebnisse und
- ▶ eine gute Übereinstimmung zu anderen quantitativen Monitoringverfahren sollten dieser Methode den Einzug in den klinischen Alltag ermöglichen. Integriert in das neuromuskuläre Monitoring ist die PMG auf dem freien Markt aber derzeit noch nicht erhältlich [15, 21].

Fazit Muskelrelaxanzien werden eingesetzt, um

- ▶ die Intubation zu erleichtern und
- ▶ die operativen Bedingungen zu optimieren. Dabei ist die Überwachung der neuromuskulären Blockade unabdingbar, da sie
- ▶ Intubationsschäden vorbeugt und
- ▶ Restblockaden gegen Operationsende aufdeckt.

Die in diesem Artikel dargestellten Methoden zur neuromuskulären Überwachung eignen sich jedoch nicht uneingeschränkt. Für den Nachweis neuromuskulärer Restblockaden sind qualitative Monitoringverfahren nicht zu empfehlen, da eine ausreichende Erholung der respiratorischen Funktion und insbesondere der oberen Atemwege nicht erfasst werden kann. Die Verwendung der 2-fachen ED₉₅ zur Narkoseeinleitung bietet ein ausreichendes Fenster zur Vermeidung von Intubationsschäden, wenn

- ▶ Anschlagzeiten berücksichtigt oder
- ▶ subjektive Beurteilungsmethoden der neuromuskulären Blockade verwendet werden. Zur zuverlässigen Erfassung des Relaxationsgrades gegen Operationsende – vor dem Hintergrund, auch minimale Restblockaden zu erkennen und sicher ausschließen zu können – müssen quantitative Verfahren angewendet werden. Hierfür eignen sich die dargestellten quantitativen Messmethoden.

Da neuromuskuläre Restblockaden zu Komplikationen führen können und die Wirkdauer von Relaxanzien unvorhersehbar ist,

- ▶ bedingt der Einsatz von Relaxanzien den Einsatz der Relaxometrie!

Die MMG ist hierfür das zuverlässigste Verfahren, jedoch ist die Etablierung der Methode im klinischen Alltag nur schwer umzusetzen. Hier stellen jedoch die AMG, die KMG und eventuell auch die PMG bei richtiger Anwendung und geringem technischem Aufwand empfehlenswerte Alternativen dar. ◀

Kernaussagen

- ▶ Eine klinische neuromuskuläre Blockade wird wahrnehmbar, wenn etwa 70 % der ACh-Rezeptoren blockiert sind. Eine komplette Relaxierung erfordert die Blockierung von über 90 % der Rezeptoren.
- ▶ Die Verwendung der 2–3-fachen ED zur Intubation reduziert bei ausreichender Muskelrelaxation das Auftreten von Intubationsschäden.
- ▶ Neuromuskuläre Restblockaden am Operationsende sind häufig verantwortlich für postoperative hypoxische Komplikationen durch Obstruktion der oberen Atemwege, eingeschränkte forcierte Vitalkapazität und pharyngeale Dysfunktion.
- ▶ Patientenadaptierte Muskelrelaxation ist aufgrund der schlechten Steuerbarkeit ohne exaktes neuromuskuläres Monitoring unmöglich.
- ▶ Verschiedene Stimulationsmuster peripherer Nerven bieten sich an: Train-of-four, Double-Burst-Stimulation, Tetanus, Post-tetanic Count.
- ▶ Subjektives (qualitatives) Monitoring bedient sich einfacher Tests, wie der taktilen oder visuellen Erfassung von Reizantworten, Kopfhebe-Versuch oder Zungen-Spatel-Test.
- ▶ TOF bietet eine gute Allround-Überwachung.
- ▶ DBS beurteilt Restblockaden am OP-Ende besser als die TOF-Stimulation.
- ▶ PTC kann tiefe Realzierungen beurteilen.
- ▶ Objektives (quantitatives) Monitoring bietet sich an, um den Relaxierungsgrad exakt wiederzugeben und neuromuskuläre Restblockaden auszuschließen.
- ▶ Quantitative Methoden objektivieren die o.g. Stimulationsmuster durch Messung von Kraft (Mechanomyographie), Geschwindigkeit (Akzeleromyographie), Bewegung (Kinemyographie), Summationspotenzialen (Elektromyographie) oder oszillierenden Schallwellen (Phonomyographie).
- ▶ Zur Vermeidung von Komplikationen durch neuromuskuläre Restblockaden muss gelten: Keine Relaxation ohne neuromuskuläres Monitoring!



Dirk Nauheimer ist Assistenzarzt am Zentrum für Anästhesiologie, Intensiv-, Notfallmedizin und Schmerztherapie, Klinikum Ludwigsburg.
E-Mail: NauDi01@kliniken-lb.de

Prof. Dr. med. Götz Geldner ist Chefarzt des Zentrums für Anästhesiologie, Intensiv-, Notfallmedizin und Schmerztherapie der regionalen Kliniken Holding Neckar-Schwarzwald.

Literaturverzeichnis

1. Schreiber JU, Fuchs-Buder T. Neuromuscular blockades: Agents, monitoring and antagonism. *Anaesthesist* 2006;55:1225–36
2. Fuchs-Buder T et al. The use of neuromuscular monitoring in Germany. *Anaesthesist* 2003;52:522–6
3. Baillard C et al. Residual curarization in the recovery room after vecuronium. *Br J Anaesth* 2000;84:394–5
4. Eikermann M et al. Postoperative upper airway obstruction after recovery of the train of four ratio of the adductor pollicis muscle from neuromuscular blockade. *Anesth Analg* 2006;102:937–42
5. Fuchs-Buder T, Eikermann M. Residual neuromuscular blockades. Clinical consequences, frequency and avoidance strategies. *Anaesthesist* 2006;55:7–16

Literatur online

Das vollständige Literaturverzeichnis zu diesem Beitrag finden Sie im Internet:

Abonnenten und Nicht-Abonnenten können unter

„www.thieme-connect.de/ejournals“ die Seite der AINS aufrufen und beim jeweiligen Artikel auf „Ergänzendes Material“ klicken – hier ist die Literatur für alle frei zugänglich.

Abonnenten können alternativ über ihren persönlichen Zugang an das Literaturverzeichnis gelangen. Wie das geht, lesen Sie unter: <http://www.thieme-connect.de/ejournals/help#SoRegistrieren>

CME-Fragen Überwachung der neuromuskulären Blockade – Methoden und Geräte

1 Die sogenannte „Sicherheitsreserve“ der neuromuskulären Übertragung meint,

- A dass mehr Acetylcholin in den synaptischen Spalt ausgeschüttet wird, als für ein Aktionspotenzial benötigt wird.
- B dass bereits ab 25–30% blockierter postsynaptischer Acetylcholinrezeptoren eine klinisch messbare Muskelschwäche auftritt.
- C dass über 75% der ACh-Rezeptoren blockiert sein müssen, um klinische Zeichen einer Muskelschwäche zu erzeugen.
- D dass sich erst nach einer Blockade von 60% der Acetylcholinrezeptoren eine bemerkbare Muskelschwäche einstellt.
- E dass nach Injektion des Muskelrelaxans ein medikamentenspezifisches Intervall vergeht, bis die Wirkung einsetzt.

2 Welche der Aussagen bzw. deren Verknüpfung trifft zu?

- 1 Eine neuromuskuläre Blockade zur Intubation kann immer Verletzungen der Stimmbänder verhindern, weil
- 2 laryngeale Schädigungen unmittelbar mit der Qualität der endotrachealen Intubation zusammenhängen.

- A Nur Aussage 1 ist richtig.
- B Nur Aussage 2 ist richtig.
- C Aussage 1 und Aussage 2 sind richtig, die Verknüpfung ist aber falsch.
- D Alle Aussagen sind falsch.
- E Alle Aussagen und die Verknüpfung sind richtig.

3 Welche Aussage zur Wirkdauer von nicht depolarisierenden Muskelrelaxanzien trifft zu?

- 1 Vecuronium ist kurz wirksam.
- 2 Mivacurium ist kurz wirksam.
- 3 Pancuronium ist ein mittellang wirkendes Muskelrelaxans.
- 4 Cis-Atracurium ist ein mittellang wirkendes Muskelrelaxans.
- 5 Rocuronium ist kurz wirksam.

- A Nur die Aussage 3 ist richtig.
- B Nur die Aussagen 2 und 4 sind richtig.
- C Nur die Aussagen 1, 2 und 5 sind richtig.
- D Alle Aussagen sind richtig.
- E Alle Aussagen sind falsch.

4 Welche Aussage trifft nicht zu? Die neuromuskuläre Stimulierung nach dem Train-of-four-Muster (TOF) ...

- A beschreibt ein quantitatives Messverfahren zur Bestimmung des Relaxierungsgrades nach neuromuskulärer Blockade.
- B beschreibt ein Stimulationsmuster bestehend aus 4 Einzelreizen à 0,1–0,2 ms mit einer Frequenz von 0,5 Hz.
- C entspricht bei 2 messbaren Reizantworten (2/4) etwa einer neuromuskulären Blockade von noch 75–80%.
- D kann bei einem Depolarisationsblock ein Fading aufweisen.
- E ist bei taktile Erfassung nur bis zu einem TOF-Quotienten von 0,4 möglich.

5 Welche Aussage zur neuromuskulären Stimulation ist richtig?

- A Die Verwendung der DBS eignet sich besser zur Erfassung neuromuskulärer Restblockaden als die TOF-Stimulation.
- B DBS beschreibt ein Stimulationsmuster, wobei 4 Einzelreize in 2 Reizserien mit 50 Hz appliziert werden.
- C Eine TOF-Ratio von 0,7 schließt hypoxische Komplikationen nahezu völlig aus.
- D Die tetanische Kontraktion erfordert Stimulationsfrequenzen zwischen 2 Hz und 5 Hz.
- E Minimale Restblockaden (TOF-Quotient von 0,8) erhöhen durch pharyngeale Dysfunktionen das Aspirationsrisiko.

6 Welche Aussage ist richtig?

- A Qualitative Verfahren eignen sich zur zuverlässigen Erfassung minimaler neuromuskulärer Restblockaden.
- B Die taktile Beurteilung des M. adductor pollicis erfordert die Stimulierung des N. medianus.
- C Qualitative Methoden zur Beurteilung neuromuskulärer Restblockaden ermöglichen es, TOF-Quotienten zwischen 0,5 und 0,9 zu differenzieren.
- D Der Kinemyographie liegt als quantitatives Verfahren die Kraftmessung zugrunde.
- E Durch Oszillation kontrahierender Myofibrillen werden Schallwellen niedriger Frequenzen emittiert, die aufgezeichnet werden können.

7 Welche Aussagen sind richtig?

- 1 Nicht depolarisierende Relaxanzien sind Steroidderivate, Toxiferinderivat und Suxamethonium.
- 2 Bei einem TOF-Quotienten von 0,8 sind Tidalvolumen, pharyngeale Funktion und hypoxische Atemantwort reduziert.
- 3 Mithilfe der Reizantworten des M. adductor pollicis, des M. corrugator supercilii oder des M. orbicularis oculi kann der Relaxierungsgrad beurteilt werden.

- A Alle Aussagen sind richtig.
- B Nur die Aussage 2 ist richtig.
- C Nur die Aussagen 1 und 3 sind richtig.
- D Nur die Aussage 3 ist richtig.
- E Alle Aussagen sind falsch.

8 Welche Aussagen bezüglich möglicher Folgen eines Relaxanzüberhangs treffen zu?

- 1 Auch bei einem TOF < 0,7 kann eine Hypoxie und Hypoventilation auftreten.
- 2 Das Tidalvolumen ist als Folge eines Relaxanzüberhangs stets eingeschränkt.
- 3 Bei einem TOF < 0,9 kann es aufgrund von Einschränkungen der Schluckfunktion zu einer Aspiration kommen.

- A Alle Aussagen sind richtig.
- B Nur die Aussagen 1 und 2 sind richtig.
- C Nur die Aussagen 1 und 3 sind richtig.
- D Nur die Aussage 3 ist richtig.
- E Alle Aussagen sind falsch.

9 Welche Aussagen treffen zu?

- 1 Quantitative Verfahren erfassen den Relaxationsgrad gegen Operationsende zuverlässig.
- 2 Die Aussagekraft qualitativer Monitoringverfahren bezüglich neuromuskulärer Restblockaden ist völlig ausreichend.
- 3 Die Verwendung einer 2-fachen ED95-Dosis zur Narkoseeinleitung kann nicht empfohlen werden.

- A Alle Aussagen sind richtig.
- B Nur die Aussage 1 ist richtig.
- C Nur die Aussage 2 ist richtig.
- D Nur die Aussage 3 ist richtig.
- E Alle Aussagen sind falsch.

10 Welche Zuordnung von Maß zu Test trifft nicht zu?

- A Kraft – Mechanomyographie
- B Beschleunigung – Akzeleromyographie
- C Bewegung – Kinemyographie
- D Summationspotenziale – Elektromyographie
- E Oszillierende Schallwellen – Neuromyographie