

# 1 Untersuchungstechnik

## 1.1 Voraussetzungen

### 1.1.1 Indikationen

Unter dem Begriff »EMG« fasst man eine Reihe elektrophysiologischer Untersuchungen zusammen, zu denen außer der Elektromyographie im engeren Sinn (»Nadel-EMG«) die motorische und sensible Neurographie zählen, weiterhin die repetitive Nervenstimulation zur Überprüfung der neuromuskulären Überleitung, die Messung der F-Antworten und diverser Reflexe sowie vegetative Funktionstests. Darüber hinaus gehören die Techniken der Magnet- und Hochvoltstimulation sowie die SEP-Methode zum methodischen Arsenal eines qualifizierten EMG-Labors, um auch proximale Abschnitte des peripheren Nervensystems einer Funktionsprüfung unterziehen zu können.

Die Aufgabe des EMG-isten besteht nun zunächst darin, bei jedem Patienten mit dem Verdacht auf eine neuromuskuläre Erkrankung die jeweils diagnostisch aussichtsreichsten Verfahren auszuwählen, um mit dem geringsten Aufwand zu einer diagnostischen Klärung zu kommen, was eine genaue Kenntnis der klinischen Symptomatik voraussetzt, sodass jeder EMG-Untersuchung eine umfassende Anamnese und gezielte neurologische Untersuchung vorausgehen muss. Dasselbe gilt für die diagnostische Abklärung autonomer Funktionsstörungen, einschließlich der häufigen ano-genitalen Syndrome, bei denen ein versierter EMG-ist wichtige Beiträge zu leisten vermag. Schließlich kann die EMG-Diagnostik nicht nur bei Erkrankungen des peripheren Nervensystems und der Skelettmuskulatur, sondern auch bei bestimmten zentralnervösen Syndromen wertvolle Hinweise liefern, wie z.B. bei den verschiedenen Tremor-Formen, bei der Analyse von Dystonien und Myoklonien, der Topodiagnostik von Hirnstamm-Läsionen sowie in der Frühdagnostik des Stiff-Man-Syndroms und des Tetanus, sodass auch diese Erkrankungen zum diagnostischen Spektrum eines leistungsfähigen EMG-Labors zählen.

Erkrankungen des peripheren Nervensystems, welche die Hauptindikation für eine EMG-Diagnostik ausmachen, sind in einer neurologischen Praxis in einer Häufigkeit von ca. 30 % vertreten, und auch in neurologischen Kliniken zählen radikuläre Syndrome, Polyneuropathien sowie diverse Neuralgien zu den häufigen Diagnosen, die zusammen etwa ein Viertel des Krankengutes ausmachen. Hieraus wird die enorme Bedeutung der bei diesen Krankheitsbildern unverzichtbaren EMG-Diagnostik ersichtlich. Immerhin zählen EMG-Untersu-

chungen zu den aussagekräftigsten Methoden, die beispielsweise bei Patienten mit dem häufigen Leitsymptom Muskelschwäche in 91 % einen diagnostisch wegweisenden Befund erbringen (Nardin et al., 2002).

### 1.1.2 Qualifikation des Untersuchers

Elektromyographische und neurographische Untersuchungen können sinnvollerweise nur von einem Arzt durchgeführt und beurteilt werden, der sowohl eingehende Kenntnisse der Nerven- und Muskelkrankheiten als auch aller einschlägigen elektro-diagnostischen Methoden besitzt. Ein Einsatz dieser Methoden durch nicht ausreichend qualifizierte Ärzte führt häufig nur zu Fehlbeurteilungen und darüber hinaus zu einer Diskriminierung der gesamten Elektrodiagnostik, der in der Hand des Erfahrenen ein hoher diagnostischer Stellenwert kommt. Vor Beginn der elektrophysiologischen Diagnostik sollte sich der Elektromyographist durch schwerpunktmäßige Exploration und klinische Untersuchung einen persönlichen Eindruck von dem jeweiligen Krankheitsbild verschaffen. Der dafür nötige Zeitaufwand wird meist durch den daraufhin möglichen gezielten Einsatz der anzuwendenden Methoden mehr als wettgemacht.

Im Unterschied zu vielen anderen apparativen Untersuchungen erfolgt die Elektromyographie nicht in einer stereotypen, sondern in einer an die jeweilige Fragestellung angepassten Weise. Der Untersuchungsgang muss daher vom Arzt bei jedem einzelnen Patienten individuell festgelegt werden, wobei er sich bei der Durchführung der Untersuchungen durch einen entsprechend ausgebildeten nicht-ärztlichen EMG-Assistenten unterstützen oder vertreten lassen kann. Die Auswertung und Beurteilung der erhobenen Befunde ist wiederum ausschließlich Sache des Arztes, der dabei auch entscheidet, ob unerwartete Messergebnisse kontrolliert und zusätzliche, das diagnostische Bild ergänzende Untersuchungen angeschlossen werden müssen.

Zur fachlichen Qualifikation des Elektromyographisten gehören auch Kenntnisse über eine mögliche Gefährdung des Patienten. Obwohl es sich bei der Elektromyographie um eine sehr risikoarme Methode handelt, müssen auch dabei bestimmte *Vorsichtsmaßnahmen* beachtet werden. Zur Vermeidung einer Übertragung ansteckender Krankheiten (Hepatitis, AIDS, Jacob-Creutzfeldsche Erkrankung) wird eine sorgfältige Beachtung

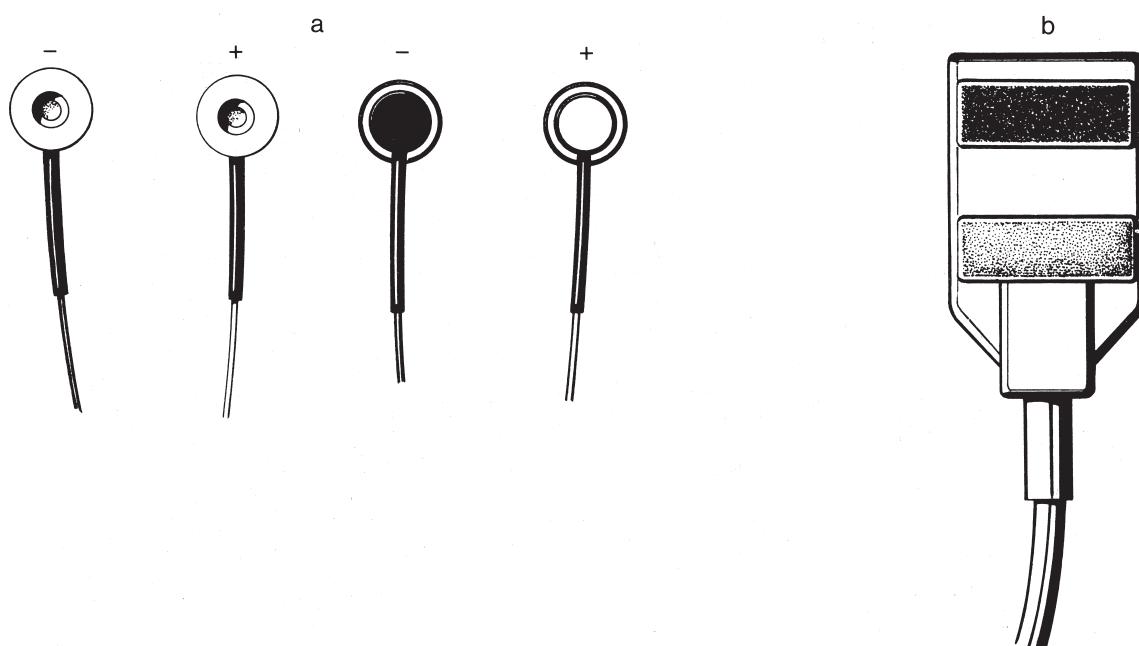
der Sterilität und eine Sterilisation der Nadelelektroden im Autoklav bei etwa 120°C gefordert (Guidelines in Electrodiagnostic Medicine, 1984). Eine Alternative hierzu ist die Verwendung von Einmalelektroden. Bei Patienten mit erhöhter Blutungsneigung (Hämophilie, Antikoagulanzien-Therapie usw.) sollte auf eine Nadel-eletromyographie verzichtet und sowohl bei der Myographie als auch bei der Neurographie lediglich eine Ableitung mit Oberflächenelektroden durchgeführt werden. Bei nur leicht erhöhter Gerinnungsneigung ist bei strenger Indikationsstellung eine Nadelableitung vertretbar, jedoch ist im Anschluss daran eine verlängerte Kompression der Einstichstelle erforderlich. Schließlich muss bei Patienten mit implantierten Herzschrittmachern in besonderer Weise auf eine gute Erdung geachtet und außerdem eine Stimulation des Armplexus auf der Seite der Implantation vermieden werden; bei Patienten mit externem Schrittmacher sind elektrische Reizungen ganz zu vermeiden (Guidelines in Electrodiagnostic Medicine, 1984) ebenso wie Magnetstimulationen.

Bei der nur noch selten durchgeführten sensiblen Neurographie mittels Nadelelektroden sind Läsionen einzelner Nervenfaszikel möglich, sofern die Nadelelektrode versehentlich intraneural platziert wird. EMG-Ableitungen von Brustmuskeln und Zwerchfell können einen Pneumothorax hervorrufen (Al-Sheklee et al., 2003). Hierbei handelt es sich jedoch um eine absolute Rarität.

### 1.1.3 Apparative Voraussetzungen und Elektroden

Zur Durchführung elektromyographischer und neurographischer Untersuchungen sind eine größere Zahl handelsüblicher *EMG-Geräte* auf dem Markt, wobei für die meisten Untersuchungen ein 1-Kanal-Gerät ausreicht. Die Bedingungen, die zur korrekten Aufzeichnung von Muskel- und Nervenpotenzialen an die Apparatur zu stellen sind, wurden von Guld et al. (1970) sowie von Ludin (1981; 1995) zusammengestellt. Für die sensible Neurographie sind eine Artefakt-Unterdrückung in der Stimulatoreinheit, besonders rauscharme Verstärker und ein Mittelwertbildner (Averager) wünschenswert. Zur korrekten Aufzeichnung und Analyse der Muskelaktionspotenziale benötigt man entweder einen Direkt-Schreiber oder eine Trigger-Einrichtung in Kombination mit einer Verzögerungsleitung und Stufenschaltung. Letzteres ermöglicht die stufenweise Darstellung von 4 Potenzialen auf dem Sichtschirm, was besonders für die Erkennung von späten Potenzialanteilen von Nutzen ist.

Zur Aufzeichnung dieser Muskel- und Nerven-Aktionspotenziale stehen verschiedenartige *Elektroden* zur Verfügung. Eine Auswahl der im eigenen Labor benutzten Typen findet sich in Abbildung 1 a-d. Die Stimulation gemischter, motorischer oder sensibler Nervenstämme erfolgt in der Regel mit bipolaren Oberflächen-elektroden (►Abb. 1e und f), diejenige sensibler Nerven



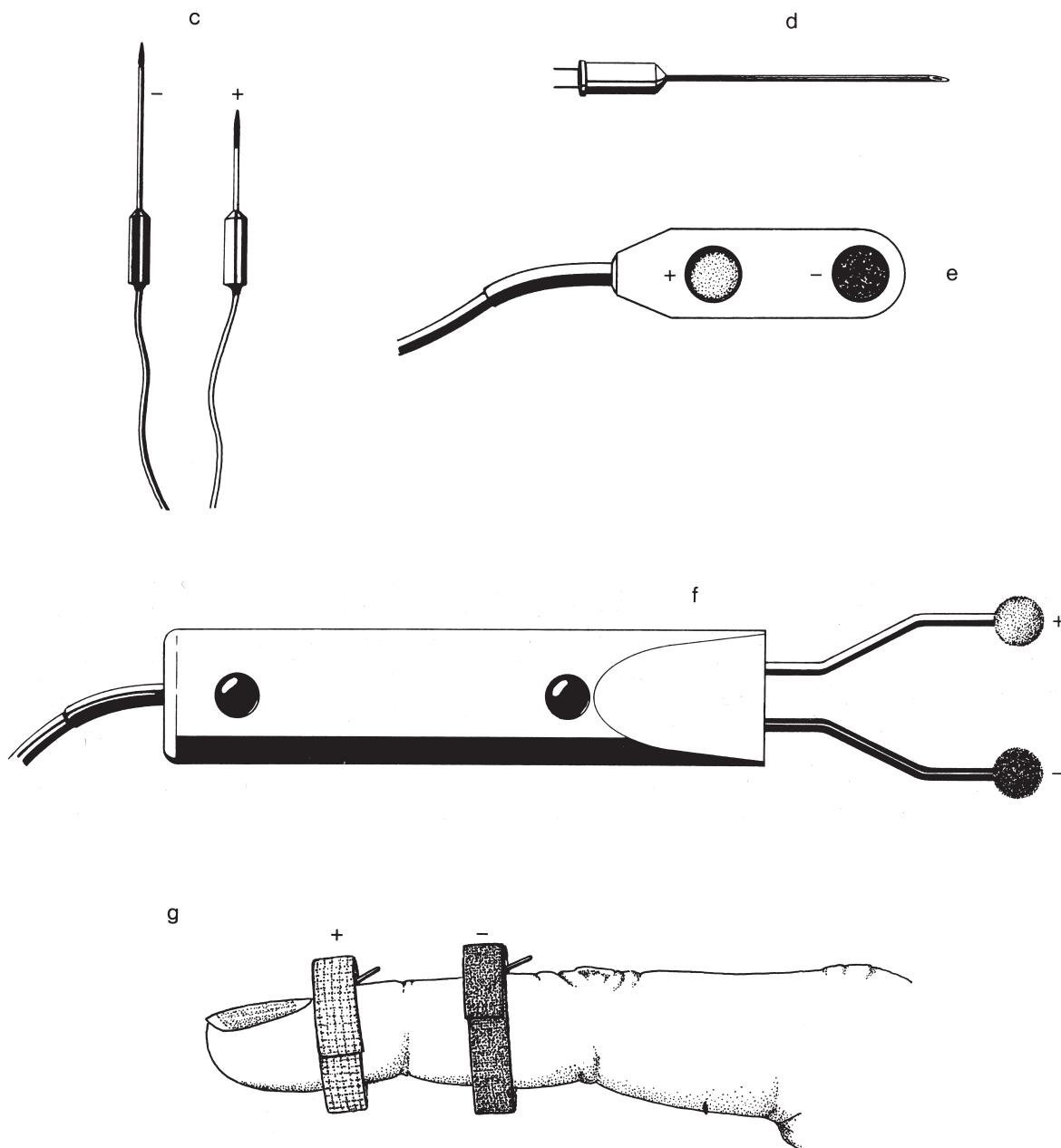
**Abb. 1:** Elektroden

a) Ableitelektroden für motorische Nervenleitgeschwindigkeits- und Reflex-Messungen.

Die Elektroden werden mit Kleberingen auf der Haut befestigt, nachdem die schalenförmige Vertiefung an der Unterseite mit Kontaktpaste gefüllt wurde. Das linke Elektrodenpaar zeigt die Ansicht von unten, das rechte die von oben, wobei die Anode hell, die Kathode dunkel dargestellt ist.

b) Bipolare Ableitelektrode für sensible Nervenleitgeschwindigkeits-Messungen.

Die beiden Filze werden mit physiologischer Kochsalzlösung angefeuchtet; danach wird die Elektrode mit einem Velkroband straff über dem zu untersuchenden sensiblen Nerven fixiert. Die dunkel dargestellte Filzelektrode entspricht der Kathode.

**Abb. 1:** Elektroden

c) Nadelelektroden für die sensible Neurographie.

Die Nadeln sind bis auf die Spitze teflon- oder glas-isoliert; die differente Elektrode ist dunkel dargestellt.

d) Konzentrische Nadelelektrode für die EMG-Ableitung.

e) und f) 2 Typen von bipolaren Reizelektroden zur Stimulation von Nervenstämmen (Kathode dunkel).

g) Ringelektroden zur Stimulation sensibler Nervenäste an Fingern und Zehen.

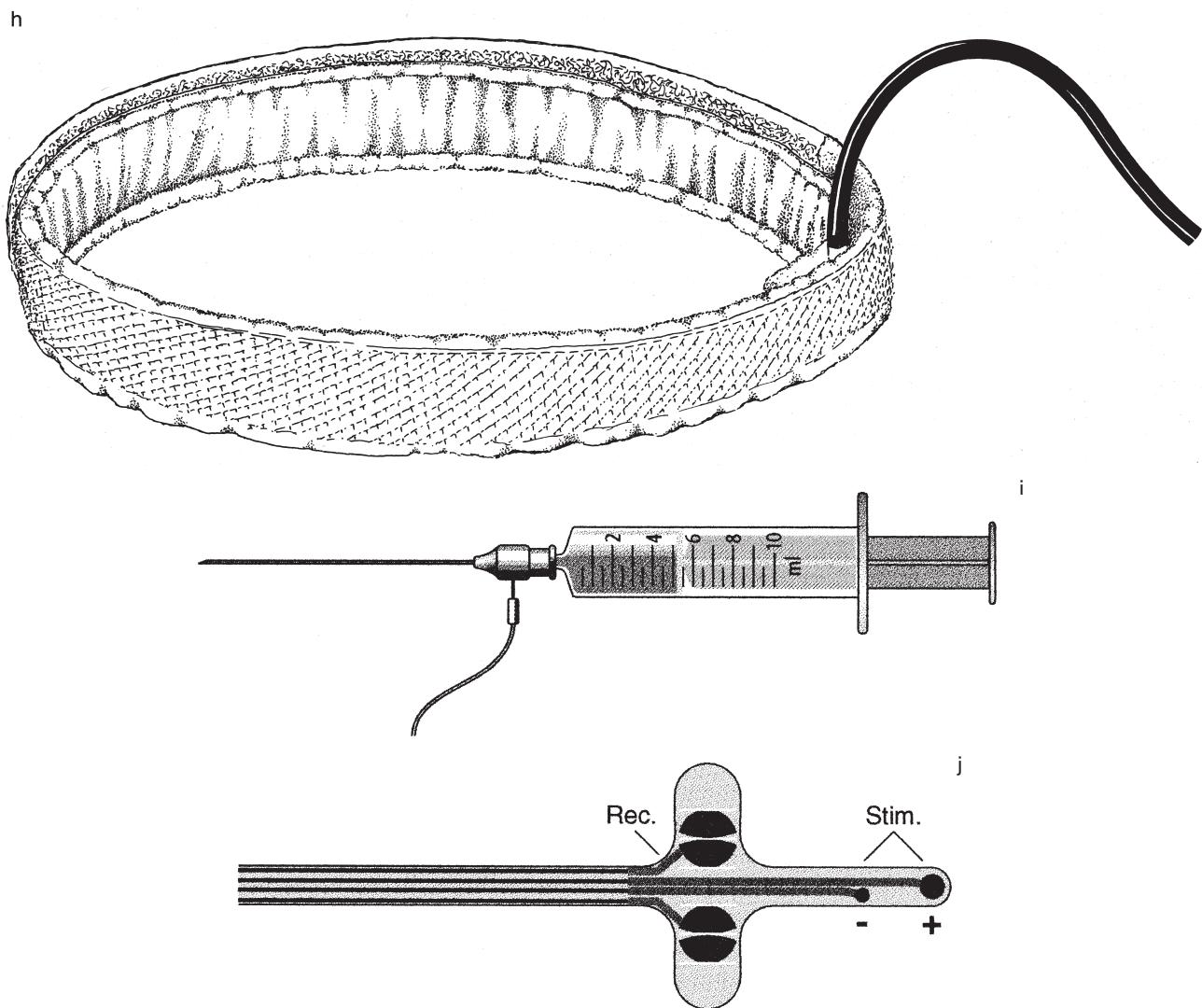
Bei der antidiromen sensiblen Neurographie werden dieselben Ringelektroden zur Ableitung der sensiblen Nervenaktionspotenziale verwendet (Kathode dunkel).

venäste an Fingern und Zehen mittels Ringelektroden (►Abb. 1g). Als Erdelektrode kann eine auf der Haut befestigte Metallscheibe oder eine gut durchfeuchtete Bandelektrode (►Abb. 1h) verwendet werden. Zur gezielten Injektion von Botulinumtoxin ist eine Elektrode entwickelt worden, mit der eine Ableitung der Muskelströme möglich ist, und durch die gleichzeitig gezielte Injektionen in ausgewählte Zielmuskeln vorgenommen werden können (►Abb. 1i). Eine weitere Spezialelektrode

dient der intrarektalen Stimulation des N. pudendus (►Abb. 1j).

Werden zur Ableitung motorischer Reizantworten Elektroden mit großem Abgriffareal ( $7-10\text{ cm}^2$ ) verwendet, verbessert sich die Reproduzierbarkeit der Messungen (Tjon-A-Tsien et al., 1996).

Für die Aufzeichnung sensibler Nervenaktionspotenziale ist ein Elektrodenabstand von 4 cm optimal (Gitter und Stolov, 1995a).

**Abb. 1:** Elektroden

h) Erdelektrode

i) Monopolare Lumenelektrode zur Ableitung von EMG-Aktivität mit der Möglichkeit einer gezielten Botulinumtoxin-Injektion.

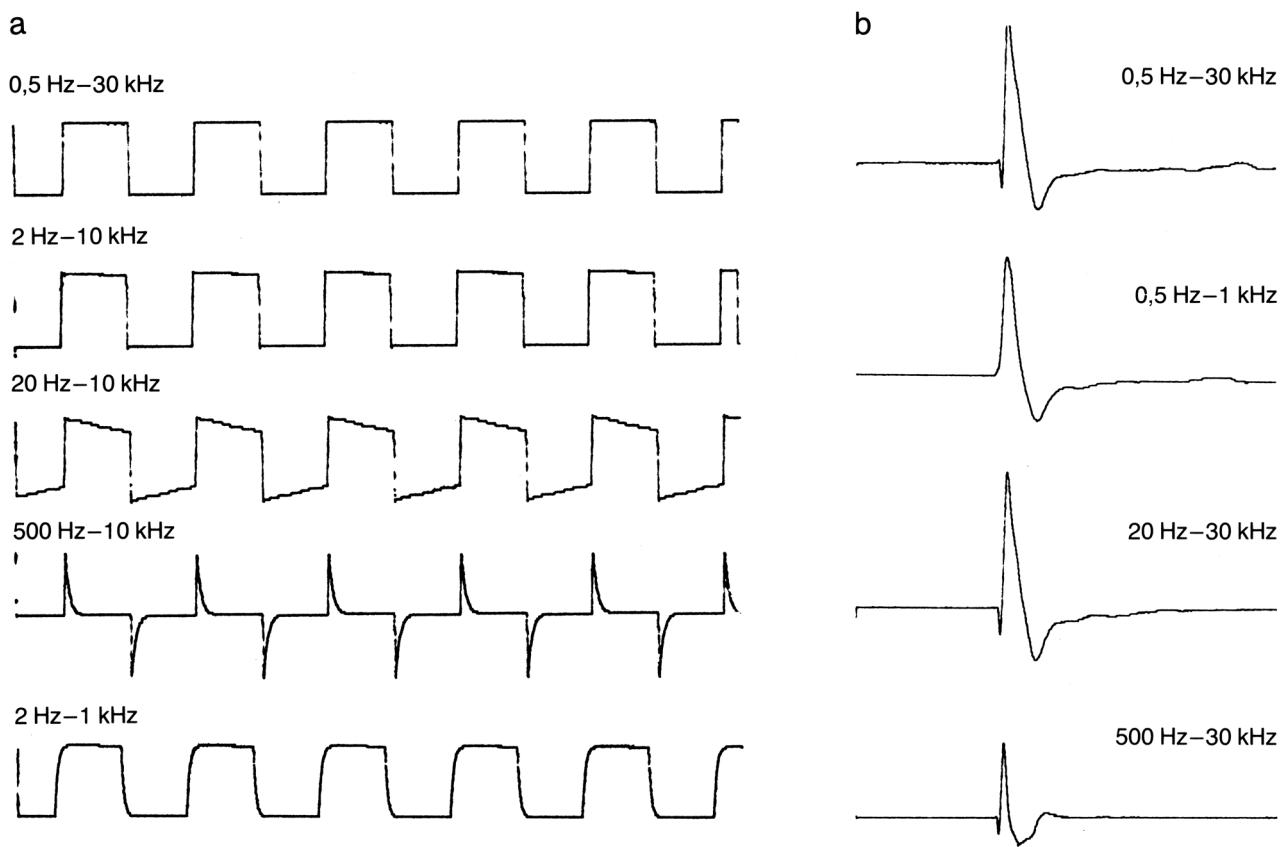
j) Pudenduselektrode zur intrarektalen N. pudendus-Simulation (Technik ►Abb. 55, S. 65).

Für die *Magnetstimulation* von Nervenwurzeln und tiefer gelegenen proximalen Nervenabschnitten werden kommerziell verschiedene Magnetstimulatoren angeboten. Diese Geräte sind an einen Eingang für externe Trigger am EMG-Gerät anzuschließen. Die Stimulatoren bauen ein sehr kurzdauerndes, sich rasch änderndes Magnetfeld auf, indem ein Kondensator über eine elektrische Spule – die Stimulationsspule – entladen wird. Empfehlenswert sind Geräte, die ein Magnetfeld von mehr als 2,0 Tesla aufbauen können. Als Ergänzung zur meistgebrauchten ringförmigen Reizspule mit etwa 10–14 cm Außendurchmesser ist eine schmetterlingsförmige Reizspule sinnvoll, welche eine bessere Reizlokalisation erlaubt (Olney et al., 1990).

Bei der konventionellen Elektromyographie sollte die *Bandbreite* des Verstärkers 5 Hz–10 kHz betragen. Treten dabei störende Grundlinienschwankungen auf, so kann die untere Grenzfrequenz auf 10–20 Hz erhöht werden. Die Einflüsse unterschiedlicher Filterungen auf

die Potenzialform sind in Abbildung 2 dargestellt. Zur Registrierung der Spontanaktivität sowie einzelner Muskelaktionspotenziale empfiehlt sich eine *Verstärkung* von 0,1 mV/cm und eine *Zeitablenkung* von 10 ms/cm, während die Aktivität bei Maximalinnervation bei Einstellungen von 1 mV/cm und 100 ms/cm aufgezeichnet wird. In Abhängigkeit von der Dauer und Amplitude der registrierten Potenziale können Abweichungen von diesen Standard-Einstellungen notwendig werden, wobei mit geringerer Verstärkung eine kürzere Potenzialdauer gemessen wird. Bei automatischer Analyse sind die Einflüsse der Verstärkereinstellungen geringer, jedoch ist in jedem Fall eine visuelle Kontrolle der automatischen Messungen erforderlich (Gitter und Stolov, 1995b) (►Tab. 1).

Außer den gewünschten biologischen Signalen werden im Rahmen elektromyographischer Untersuchungen immer wieder verschiedenartige *Artefakte* registriert, deren Erkennung und Ausschaltung für eine sorgfältige Potenzialanalyse unerlässlich sind (►Abb. 3).

**Abb. 2:** Filtereinflüsse

a) Auswirkungen verschiedener Filtereinstellungen auf die Form eines Eichsignals

b) Muskelaktionspotenzial bei unterschiedlichen Filtereinstellungen. Verlust der initialen Spikekomponente bei einer oberen Grenzfrequenz von 1 kHz (Zeile 2), Erniedrigung und »Zuspitzung« des Potenzials bei einer unteren Grenzfrequenz von 500 Hz (Zeile 4).

**Tab. 1:** Empfohlene Geräteeinstellungen bei elektromyographischen und neurographischen Untersuchungsmethoden

	EMG			NLG		Reflexe			F-Welle	Neuromusk. Überleitung	SEP (proximale Neurographie)
	Spon- tan- akti- vität	MAP- Analysse	Maxi- mal- inner- vation	moto- risch	sensi- bel	HR	OOR	andere Reflexe			
Kipp- geschwindig- keit (ms/Div)	10	10	100	2-5	1-2	10	10	5-10	10	100-200	5
Verstärkung (mV/Div)	0,1	0,1-0,2	1	2 (0,5-5)	10 µV	0,2-0,5	0,2-0,5	0,2-0,5	0,1-0,2	2-5	5 µV
Filter- einstellungen - oberer Grenzwert in kHz	10	10	10	10	3	10	10	10	10	10	3
- unterer Grenzwert in Hz	5 (-20)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10-30
Reizstärke	-	-	-	supra- max.	supra- max.	sub- max.	supra- max.	supra- max.	supra- max.	supra- max.	3fache sensib- le Schwelle bzw. deutliche motorische Antwort
Reizfrequenz				Einzel- reiz	3/s	Einzelreize mit großen und variablen Reizabständen			Einzel- reize	3 Hz/ 30 Hz train	1-5 Hz

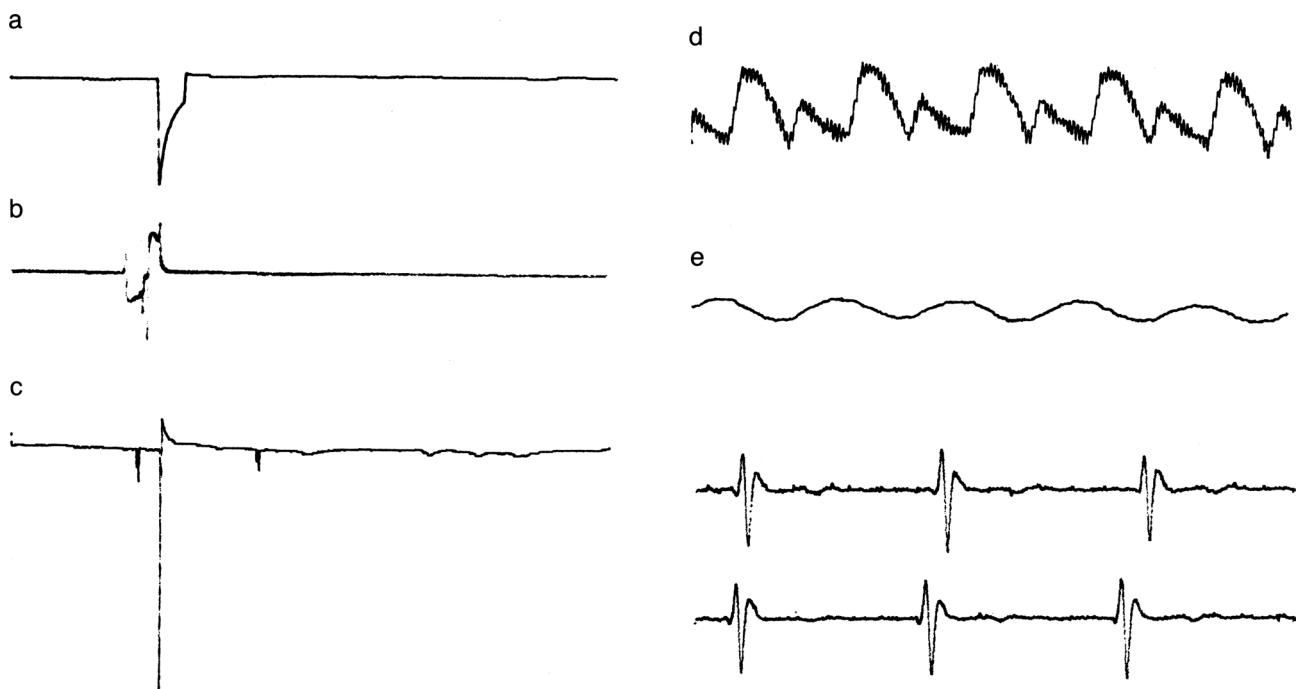


Abb. 3: EMG-Artefakte

- a) und b) Herzschrittmacher
- c) Einschalten der Deckenbeleuchtung
- d) Lockerung der Ableitelektrode (Oberflächenelektrode)
- e) Wechselstrominstreuung (50Hz) bei ungenügend angefeuchteter Erdelektrode
- f) EKG-Artefakt (M. pectoralis)

## 1.2 EMG-Ableitung

### 1.2.1 Einleitung

Aus der Fülle von ca. 400 menschlichen Muskeln wurden die in Abbildungen 5–29 dargestellten Muskeln, welche in der elektromyographischen Diagnostik von neuromuskulären Krankheiten sowie bei einigen Erkrankungen des zentralen Nervensystems von besonderer Bedeutung sind, ausgewählt. Hierbei wurde keine Vollständigkeit, sondern eine Beschränkung auf diagnostisch wichtige Muskeln angestrebt. So wurden z. B. aus sämtlichen Streckmuskeln am Ober- und Unterarm 3 Muskeln – die Mm. triceps brachii, extensor carpi radialis und abductor pollicis longus – herausgegriffen, durch deren Untersuchung alle praktisch wichtigen Typen von Radialislähmung festgestellt werden können. Eine Läsion des N. radialis in der Axilla führt zu elektromyographisch faßbaren Veränderungen in allen 3 genannten Muskeln, eine Läsion im mittleren Oberarmdrittel spart die Nervenäste zum M. triceps brachii aus, eine Läsion im proximalen Unterarmabschnitt auch die zum Extensor carpi radialis, sodass in diesem Fall ein normaler EMG-Befund in den Mm. triceps brachii und extensor carpi radialis, ein pathologischer Befund im Abductor pollicis longus erhoben wird. Dieses Darstellungs- und Untersuchungs-Prinzip setzt voraus, dass die Elektromyographie nicht anstelle der neurologischen

Untersuchung, sondern als deren Hilfsmittel eingesetzt wird, um ergänzende Informationen zu erlangen.

Aus Rücksicht auf den Patienten sollte versucht werden, die gewünschte Information mit einem Minimum an Nadelableitungen zu erlangen. So kann es z. B. bei einem Patienten mit dem Typ der distalen Ulnarisparese (Lähmung und Atrophie der ulnarisinnervierten Handmuskeln) ausreichend sein, eine Nadelableitung aus dem ulnaren Anteil des M. flexor digitorum profundus am Unterarm vorzunehmen, da das Betroffensein der Handmuskeln schon klinisch eindeutig ist. Ergibt diese Ableitung einen Normalbefund, ist in Übereinstimmung mit dem klinischen Bild eine Ulnarisläsion in Höhe des Handgelenks wahrscheinlich; ergibt sich dagegen ein pathologischer Befund, ist eine bevorzugte Läsion der den Handmuskeln zugehörigen Ulnarisfaszikel z. B. im Sulcus ulnaris anzunehmen und eine Nervenleitgeschwindigkeits-Messung in diesem Abschnitt anzuschließen.

### 1.2.2 Allgemeine Hinweise zur Durchführung einer EMG-Ableitung

Nach Auswahl der für den jeweiligen Muskel geeigneten Nadelelektrode und Desinfektion der Haut erfolgt der *Einstich* der Nadel, welcher bei voluminösen Mus-

keln senkrecht zur Oberfläche, bei flachen Muskeln im spitzen Winkel und etwas quer zu deren Verlauf vorgenommen wird. Nach dem Einstich wird der Verstärker geöffnet. Solange sich die Nadelspitze noch im Unterhautgewebe befindet, ist im Lautsprecher ein helles Rauschen zu hören. Das Eindringen der Nadelelektrode in das Muskelparenchym zeigt sich durch Einstich-Aktivität (2.1.1.) an.

Die von Buchthal (1958) eingeführte simultane EMG-Ableitung mit bis zu 4 Nadelelektroden, die mit einem Mindestabstand von 5–10 mm in den Muskel eingestochen werden, ist nur im Zusammenhang mit einer Filmregistrierung als Alternative anzusehen und im allgemeinen wegen der Vielzahl simultan auftretender Signale eher verwirrend.

Nach erfolgtem Eindringen der Nadelspitze in das Muskelparenchym wird die Elektrode in Schritten von 1–2 mm immer tiefer eingeführt und dabei auf *Spontanaktivität* geachtet. Die meisten Formen von Spontanaktivität sind sofort nach dem Nadeleinstich vorhanden und zu diesem Zeitpunkt sogar am deutlichsten. Dies gilt nicht für Faszikulationen, die bei spärlicher Ausprägung in langen Intervallen auftreten können. Um auch diese Form von Spontanaktivität nicht zu übersehen, muss die Nadelelektrode mindestens 1 min bei hoher Verstärkerempfindlichkeit liegen bleiben.

Sobald die Nadelelektrode vollständig in den Muskel eingeführt ist, beginnt der zweite Untersuchungsabschnitt – die *Analyse der Muskelaktionspotenziale* (MAP). Hierzu lässt man den Muskel leicht anspannen, wobei der Patient auf die Kontrollmöglichkeit der Stärke der Anspannung durch die im Lautsprecher hörbaren Signale hingewiesen wird. Optimal ist die Aktivierung jeweils einer motorischen Einheit, da bei gleichzeitiger Aktivierung mehrerer motorischer Einheiten eine Überlagerung der Einheitspotenziale eintritt, was deren Abgrenzung erschwert. Für die Analyse akzeptiert werden nur Potenziale, die in identischer Form mindestens dreimal sichtbar sind, außerdem nur Potenziale mit steilen Potenzialanteilen, da diese die unmittelbare Nachbarschaft der Nadelspitze zur aktiven motorischen Einheit anzeigen. Beim langsamen Zurückziehen der Nadel sieht und hört man, wie die Elektrodenspitze nach und nach in die Nähe weiterer motorischer Einheiten gelangt, deren Potenziale jeweils aufgezeichnet und bezüglich Dauer, Amplitude, Form und Phasenzahl analysiert werden (2.1.2.). Vorteilhaft ist dabei die Triggerung des Kathodenstrahls durch das jeweilige Einheitspotenzial unter gleichzeitiger Einschaltung einer Verzögerungsleitung. Bei Wahl einer Stufenschaltung lassen sich damit 4–6 MAP untereinander auf dem Sichtschirm darstellen und bezüglich ihrer formalen Identität beurteilen. Ist diese gegeben, kann die Ausmessung der Potenziale entweder auf dem Schirm oder nach erfolgter Registrierung auf dem Papierausdruck erfolgen.

Die Nadelinsertion wird an mindestens 4 Stellen des untersuchten Muskels wiederholt, bis etwa 20 Muskelaktionspotenziale registriert sind. Dabei ist darauf zu achten, dass die verschiedenen Einstichstellen quer und nicht längs zum Muskelfaserverlauf gelegen sind,

da sonst unter Umständen dieselben motorischen Einheiten – lediglich in unterschiedlicher Höhe im Längsverlauf des Muskels – untersucht werden. Für manche Fragestellungen genügt auch eine geringere Zahl ausgemessener MAP, um zu einer eindeutigen Beurteilung zu kommen, z. B. bei traumatischen Nerven- und bei Wurzel-Läsionen.

Bei Störungen der neuromuskulären Überleitung, frischer Reinnervation oder kollateralen Sprossungsvorgängen können aufeinanderfolgende Potenziale derselben motorischen Einheit zum Teil erhebliche formale Unterschiede aufweisen (vgl. »Jitter« und »intermittierende Blockierungen«; s. S. 23 und 128). Trotz solcher Formabweichungen ist die Grundform des betreffenden Einheitspotenzials bei Darstellung in der beschriebenen Weise meist erkennbar und die Herkunft der verschieden geformten MAP von derselben motorischen Einheit zu sichern. Die bessere Erkennung solcher formalen Feinheiten kann als entscheidender Vorteil der EMG-Ableitung mit nur einer Nadel gegenüber der simultanen Aufzeichnung von Muskelaktionspotenzialen mittels mehrerer Elektroden (Buchthal, 1958; Ludin, 1997) angesehen werden.

Als dritter Schritt der EMG-Untersuchung schließt sich die Prüfung des Aktivitätsmusters *bei Maximalinnervation* an zwei bis drei verschiedenen Stellen des untersuchten Muskels an. Hierzu lässt man den Muskel isometrisch in langsam zunehmender Stärke anspannen und korreliert die Entladungsfrequenz und die Rekrutierung immer neuer motorischer Einheiten mit der Kraftentfaltung. Das Muster bei maximaler Muskelanspannung wird zur Dokumentation aufgezeichnet.

Bei EMG-Ableitungen im Säuglings- und Kleinkindesalter muss man sich teilweise mit der Feststellung vorhandener oder fehlender Spontanaktivität begnügen. Allerdings gelingt es öfters, durch Hautreize oder passive Bewegungen eine passagere Innervation des untersuchten Muskels zu erreichen. Am besten eignet sich hierzu der M. tibialis anterior, der bei repetitivem leichten Bestreichen der Fußsohle oft schwach angespannt wird, sodass eine grobe Beurteilung von Muskelaktionspotenzialen möglich ist. Durch einen leicht schmerhaften Reiz erfolgt meist eine kräftige Beugebewegung des Beines mit entsprechender Beteiligung des M. tibialis anterior, was eine Abschätzung des Rekrutierungsmusters gestattet.

Oberflächen-EMG-Ableitungen sind nicht geeignet, um neuromuskuläre Erkrankungen einschließlich Radikulopathien zu diagnostizieren, können aber sinnvollerweise eingesetzt werden bei der Analyse von Bewegungsstörungen – insbesondere Dystonien, Tremoren und Myoklonien (Pullman et al., 2000).

## 1.2.3 Spezielle Analysetechniken

### 1.2.3.1 Technik der Einzelfaser-Elektromyographie

**Prinzip:** Die von Ekstedt (1964) und Stålberg entwickelte Methode der Einzelfaser-Elektromyographie (Single Fiber-EMG) unterscheidet sich von der konventionellen Elektromyographie durch die Verwendung von spe-

ziellen Elektroden mit wesentlich kleinerem Aufnahmeradius. Das bedeutet, dass bei der Ableitung aus einem normalen Muskel in der Regel nur die elektrische Aktivität jeweils einer einzigen Muskelfaser registriert wird. Gelegentlich ist die Elektrode so positioniert, dass im normalen Muskel die Aktivität von zwei, selten auch drei, benachbarten Muskelfasern derselben motorischen Einheit in Form von 2 bzw. 3 Einzelspikes aufgezeichnet wird. Ist die Faserdichte erhöht, z. B. nach Reinnervation durch kollaterale Aussprossung, so liegen mehrere Fasern derselben motorischen Einheit im Aufnahmeradius der Einzelfaser-Elektrode, und es werden entsprechend komplexere Potenziale registriert (2.1.2.). Dies ist die Basis der Messung der mittleren Faserdichte eines Muskels (Stålberg und Ekstedt, 1973).

Klinisches Hauptanwendungsgebiet der Einzelfaser-Elektromyographie ist aber der empfindliche Nachweis von Störungen der neuromuskulären Übertragung. Diese machen sich dadurch bemerkbar, dass die Zeitdauer der neuromuskulären Übertragung, d. h. die Zeitdauer zwischen dem Eintreffen eines Nervenaktionspotenzials an der Synapse und dem Beginn des dadurch hervorgerufenen Aktionspotenzials der Muskelfaser, von Entladung zu Entladung variiert. Der Nachweis dieser Variabilität ist mittels Einzelfaser-Elektromyographie auf zwei Arten möglich: Bei der stimulierten Einzelfaser-Elektromyographie (Trontelj et al., 1986) werden einzelne motorische Axone repetitiv elektrisch stimuliert und die Zeiten bis zur Entstehung der Muskelfaser-Aktionspotenziale gemessen (►Abb. 4). Bei der »klassischen« Einzelfaser-Elektromyographie (Stålberg et al., 1971) muss die Einzelfaserelektrode im Muskel jeweils so positioniert werden, dass Aktionspotenziale von zwei Muskelfasern derselben motorischen Einheit registriert werden. Die Zeitdauer zwischen den Entladungen der beiden Muskelfasern wird gemessen (►Abb. 5).

**Methodik:** Grundsätzlich kann jeder zur EMG-Ableitung geeignete Muskel auch mittels Einzelfaser-Elektromyographie untersucht werden. Am häufigsten wird beim Verdacht auf eine Myasthenia gravis der M. extensor digitorum communis untersucht. Diagnostisch noch sensibler ist die Untersuchung des M. frontalis (Sanders, 2002).

Die Geräteeinstellungen für die Einzelfaser-Elektromyographie sind: Empfindlichkeit 0,1–2 mV/Div, Filter 500 Hz–10 kHz, Zeitbasis 0,5–2 ms/Div, Signaltrigger mit einer Signalverzögerung von 2–3 Div, Kaskadendarstellung der registrierten Potenziale.

Zur Untersuchung wird die Einzelfaser-Elektrode in den Muskel eingestochen, der möglichst gleichmäßig leicht angespannt werden sollte. Dann wird die Elektrode im Muskel so positioniert, dass die Aktionspotenziale von zwei Muskelfasern derselben motorischen Einheit registriert werden. Das ist am Bildschirm an der zeitlichen Kopplung zweier Potenziale erkennbar. Ist dies gelungen, werden mindestens 50 dieser Potenzialpaare in Kaskadendarstellung registriert, und daraus Jitter und Anzahl der Blockierungen bestimmt (►Abb. 5). Bei automatischer Bestimmung ist die Überwachung und ggf. Korrektur durch den Untersucher unerlässlich. Der Vorgang wird mit einer anderen Elektrodenposition wie-

derholt bis mindestens 20 Potenzialkaskaden ausgewertet sind. Der Jitter liegt beim Gesunden, je nach Messverfahren und Muskel, unter 30–55 µs; Blockierungen kommen beim Gesunden nicht vor.

Für die stimulierte Einzelfaser-Elektromyographie genügt es, die Einzelfaser-Elektrode so zu positionieren, dass Potenziale einer einzelnen Muskelfaser registriert werden; die Suche nach Potenzialpaaren entfällt damit ebenso wie die manchmal schwierige konstante Willkürinnervation. Dafür ist es notwendig, eine dünne monopolare Nadelelektrode zur Stimulation der distalen Axone zu verwenden. Der Reizstrom beträgt dabei in der Regel 2–5 mA. Auch hier werden mindestens 50 Reizantworten in Kaskadendarstellung registriert und die Untersuchung an mindestens 20 verschiedenen Ableitorten wiederholt. Der so gemessene Jitter (►Abb. 4) ist um ca. 30 %–50 % kleiner als bei der »klassischen« Einzelfaser-Elektromyographie. Nicht selten werden Jitterwerte unterhalb von 10 µs gemessen. Das ist ein Artefakt, der durch die direkte, also postsynaptische Stimulation von Muskelfasern verursacht wird.

**Klinische Anwendung:** Domäne der Einzelfaser-Elektromyographie in der Klinik ist der empfindliche Nachweis auch subklinischer Störungen der neuromuskulären Transmission, wie z. B. bei Myasthenia gravis, Lambert-Eaton-Syndrom oder Botulismus (Bischoff, 2000). Speziell bei Patienten mit okulärer Myasthenie kann die Einzelfaser-Elektromyographie die einzige Zusatzuntersuchung (vgl. 1.5) sein, die einen pathologischen – und gleichzeitig wegweisenden – Befund zeigt. Gerade in diesen Fällen gilt die Untersuchung des M. frontalis als besonders empfindlich (Sanders, 2002). Der Preis dieses Vorzugs der Einzelfaser-Elektromyographie ist der erhebliche Zeitbedarf für die Untersuchung und die Anforderung an die Qualifikation des Untersuchers. So erscheint der Einsatz in der Routinediagnostik nur bei ausgewählten Fragestellungen – wie der zuvor genannten – sinnvoll, und dies auch nur durch einen einschlägig geübten Untersucher.

### 1.2.3.2 Makro-EMG

Die von Stålberg eingeführte Methode des *Makro-EMG* zielt auf eine Erfassung der elektrischen Aktivität der gesamten motorischen Einheit durch Verwendung einer Nadelelektrode mit großem Ableitungsradius, während die Hauptkomponenten der mit konventionellen Nadel-Elektroden registrierten Muskelaktionspotenziale lediglich das Summenaktionspotenzial der unmittelbar benachbarten Muskelfasern repräsentieren (Stålberg und Fawcett, 1982; Nix et al., 1990).

Beim Makro-EMG reflektieren die Potenzialamplituden die Größe der motorischen Einheiten und sind daher bei Myopathien herabgesetzt (außer bei der chronischen Polymyositis im Regenerationsstadium). Spezielle Nadelkonstruktionen erlauben simultane Aufzeichnungen von Makro-EMG und konventionellem EMG (wie es mit konzentrischen Nadelelektroden abgeleitet wird) (Jabre, 1991).

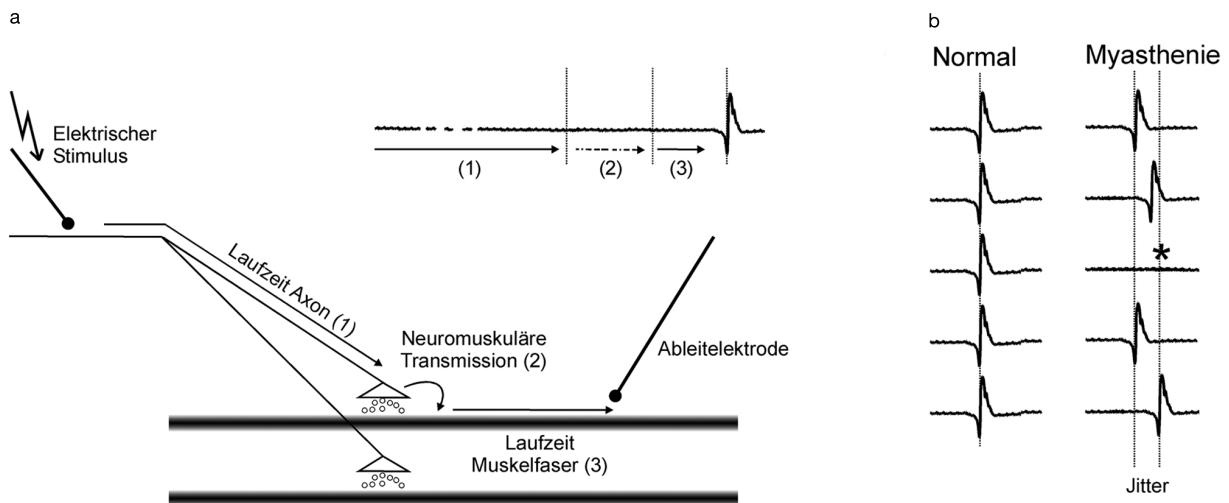


Abb.4: Stimuliertes Einzelfaser-EMG

a) Methode: Elektrische Reizung eines motorischen Axons in der Nähe der Endplattenregion, Ableitung der Reizantwort von einer einzelnen, durch dieses Axon innervierten Muskelfaser. Messung der Latenzzeit, die sich zusammensetzt aus der Laufzeit des Aktionspotenzials durch das Axon (1), der Zeit für die neuromuskuläre Transmission im synaptischen Spalt (2) und der Laufzeit des Aktionspotenzials längs der Muskelfaser bis zur Ableiteelektrode (3). Die Zeiten (1) und (3) sind konstant. Die Zeit für die neuromuskuläre Transmission (2) ist bei Gesunden ebenfalls weitgehend konstant, während sie sich bei Patienten mit Störungen der neuromuskulären Transmission von Reiz zu Reiz ändert.

b) Reizantworten nach fünf aufeinanderfolgenden elektrischen Stimuli. Bei der Normalperson sind die Latenzen konstant. Beim Patienten mit Myasthenie sind die Latenzen infolge der Variabilität der Zeit (2) variabel (»Jitter«) und einzelne Reizantworten können fehlen (\*, »Blockierung«).

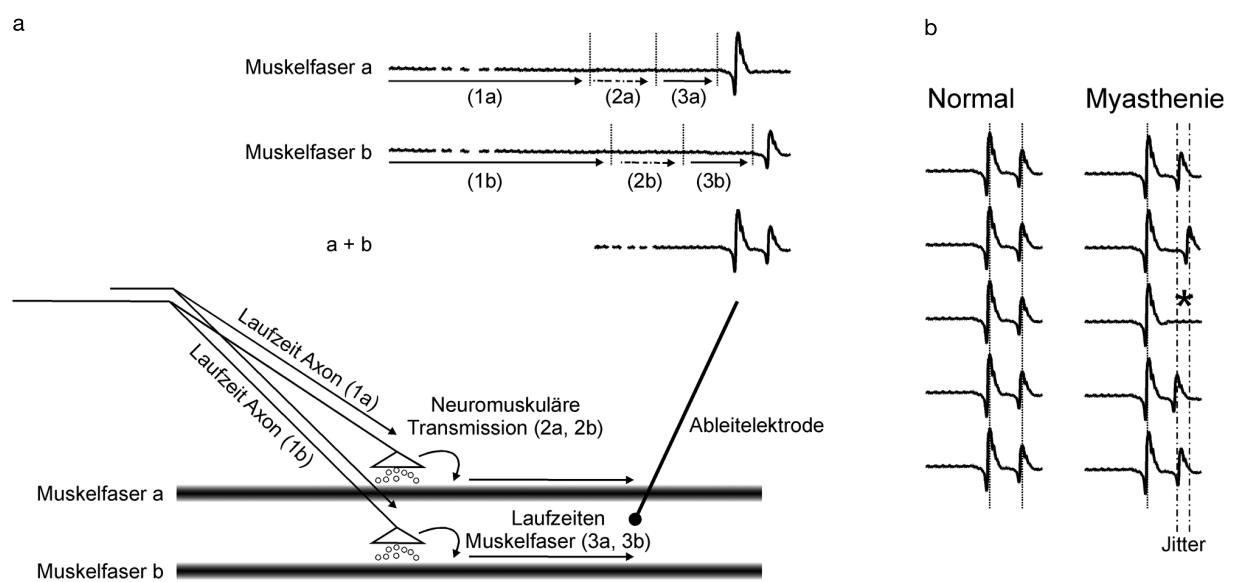


Abb.5: Einzelfaser-EMG

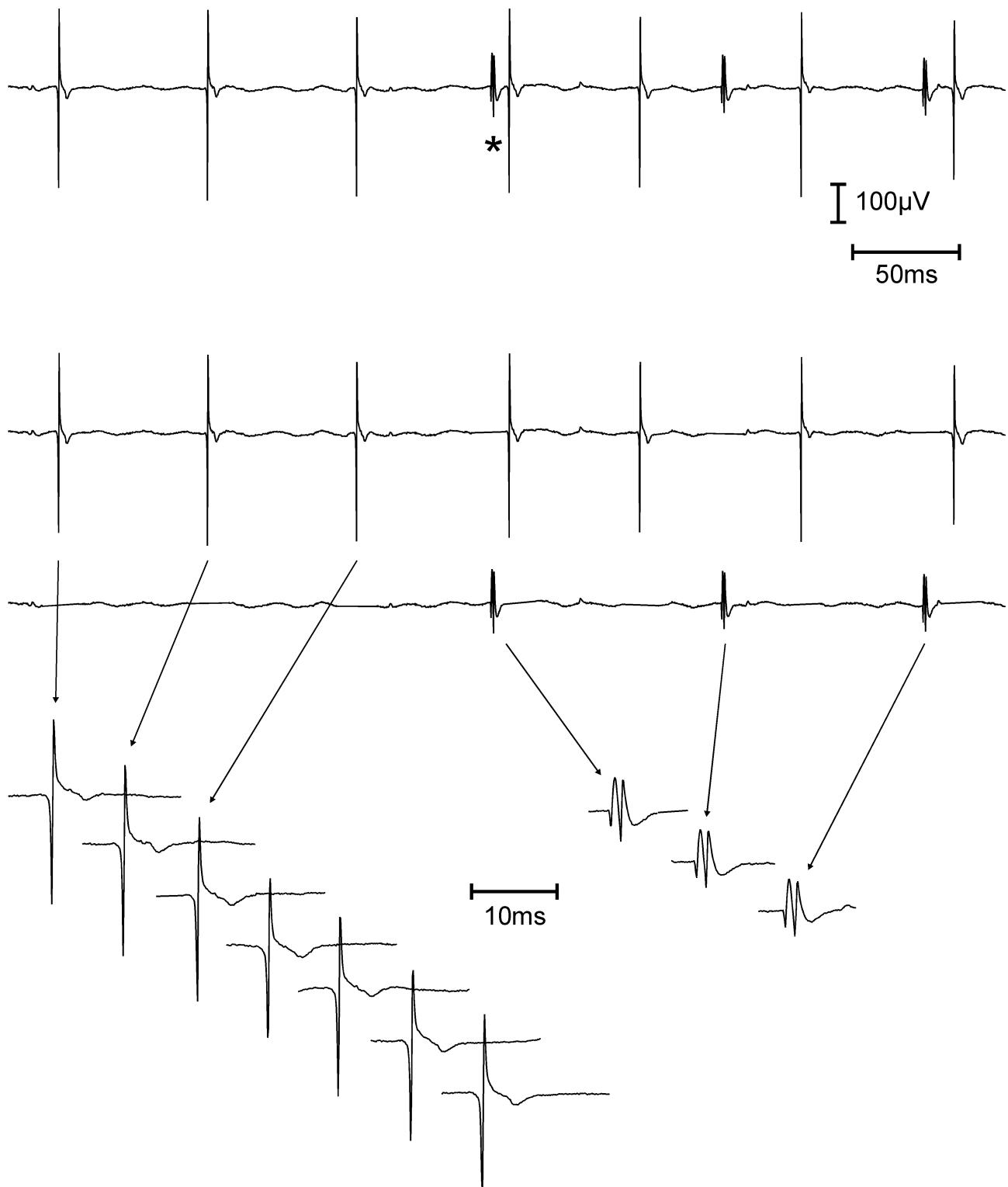
a) Methode: Willkürliche Innervation einer motorischen Einheit, Ableitung der Aktionspotenziale von zwei Muskelfasern dieser Einheit. Die Latenzzeiten der Aktionspotenziale der einzelnen Muskelfasern setzen sich jeweils zusammen aus der Laufzeit des Aktionspotenzials durch das Axon und seine Endaufzweigung (1a bzw. 1b), der Zeit für die neuromuskuläre Transmission (2a, 2b) und der Laufzeit des Aktionspotenzials längs der Muskelfaser bis zur Ableiteelektrode (3a, 3b). Das registrierte Potenzial setzt sich aus den Potenzialen der Muskelfasern a und b zusammen (a + b).

b) Registrierungen bei fünf aufeinanderfolgenden Entladungen der motorischen Einheit. Bei der Normalperson ist das Intervall zwischen den Aktionspotenzialen der beiden Muskelfasern konstant. Beim Patienten mit Myasthenie ist das Intervall infolge der Variabilität der Zeiten (2a) und (2b) variabel (»Jitter«) und einzelne Reizantworten können fehlen (\*, »Blockierung«).

### 1.2.3.3 Automatische Analyse der Potenziale motorischer Einheiten

Seit der Entwicklung der Elektromyographie wird darauf hingewiesen, dass die quantitative Analyse der

MAP anzustreben sei. Unter »quantitativer Analyse« wurde zunächst häufig nur die Messung der Potenzialdauer verstanden. Weitere Werte haben sich als bedeutsam erwiesen, wie die Amplitude (in Beziehung zur Rise-Time) und die Entladungsfrequenz motorischer Einheiten.



**Abb. 6:** Prinzip der automatischen EMG-Potenzialanalyse

- Nadel-Elektromyogramm aus dem M. biceps brachii eines Gesunden. Die Registrierung enthält Aktionspotenziale zweier motorischer Einheiten, die sich an einer Stelle teilweise überlagern (\*).
- Zerlegung (»Dekomposition«) der oberen Kurve in zwei Komponenten, die jeweils nur die Aktionspotenziale einer einzigen motorischen Einheit enthalten.
- Extrahierte Potenziale der beiden motorischen Einheiten aus den Kurven in der Mitte (Pfeile).

heiten, und lassen sich quantitativ erfassen (Bischoff, 1997). Eine quantitative Analyse der MAP unterbleibt aber häufig, da der damit verbundene Aufwand gefürchtet wird. Zahlreiche Versuche sind unternommen

worden, die quantitative EMG- Analyse mit Hilfe von Computerprogrammen zu erleichtern und zu verbessern. Diese Entwicklung hält an. Dabei besteht jedoch noch wenig Einigkeit über den tatsächlichen Nutzen