

EXTRAKORPORAL ERZEUGTE STOSS- UND DRUCKWELLEN - EINE WIRKSAME THERAPIEFORM FÜR DIE GEWEBEREGENERATION

Dr. U. Dreisilker¹, Dr. O. Wess², Dr. P. Novak²

Stoß- und Druckwellen werden mit hoher Erfolgsquote in einer Vielzahl orthopädischer Indikationen angewendet. Die Therapie besteht in der Einleitung energiereicher mechanischer Druckpulse in oberflächliche und tiefere Gewebereiche. Medizinisch angewendet werden heute Stoßwellen (SW) mit extrem kurzen Druckpulsdauern (ca. 0,3-1 Mikrosekunden) und Druckwellen (DW) mit langen Pulsdauern (> ca. 100-1000 Mikrosekunden).

Im Wasserbad, das ähnliche Eigenschaften wie Weichgewebe aufweist, errechnet sich daraus eine Pulslänge von ca. 0,45-1,5 mm für SW und ca. 15-150 cm für die entsprechenden DW. In beiden Fällen handelt es sich um mechanische Wellen, die als Druckimpuls im Gewebe fortgeleitet werden und eine Intensivierung der Durchblutung und der Stoffwechselprozesse zur Folge haben. Diese werden für verschiedene Heilungsprozesse bzw. für eine Geweberegeneration verantwortlich gemacht. Trotz einer gewissen Ähnlichkeit von SW und DW hat insbesondere der extreme Unterschied in der Pulslänge (Faktor bis zu 1000) einen wesentlichen Einfluss auf die Dimensionen des akustischen Feldes und damit auf die Art der Anwendung von SW und DW.

Stoßwellen

Auf Grund der kurzen Pulslänge lassen sich SW auf Bereiche von wenigen Millimetern Durchmesser konzentrieren, so dass eine lokal

eng begrenzte Anwendung auch in tieferen Gewebeschichten möglich ist. Mit Hilfe von akustischen Spiegeln oder Linsen lassen sich unterschiedliche Therapiezonen (flächig oder konzentriert) an der Körperoberfläche bzw. in der Tiefe des Gewebes erzeugen. Therapeutisch effektive Energiewerte erreicht man, indem die abgestrahlten Druckspitzen auf Werte von einigen 10 MPa (Megapascal entsprechend 100 bar) gesteigert werden. Obwohl biologisch nicht genauer begründet, wird ein Druckwert von 5 MPa (50 bar) als Grenze der therapeutischen Wirksamkeit angenommen. Damit lässt sich das Gebiet der therapeutischen Wirksamkeit definieren und den anatomischen Gegebenheiten anpassen. Als Beispiel sind die Fokus- und Therapiezonen für verschiedene Therapieköpfe in Abb. 1 schematisch dargestellt. Neben der physikalisch definierten (-6dB)-Fokuszone (Zone, in der der Druck größer als 50% des Spitzendrucks ist) ist auch der Bereich der angenommenen therapeutischen Wirksamkeit von 5 MPa dargestellt. Man erkennt die Möglichkeit, die Behandlungszone so zu formen, dass z.B. die Behandlung tief liegender Triggerpunkte möglich ist. Mit Hilfe eines planaren Therapiekopfes lässt sich dagegen die therapeutische Wirkung auf oberflächennahe Schichten begrenzen, z.B. bei der Therapie schlecht heilender Wunden.

Druckwellen

Einen anderen technischen Ansatz macht man bei der Anwendung

von langwelligen Druckpulsen (Pulslänge im Wasser bzw. Weichgewebe 15-150 cm). Hier wird ein Stempel auf der Hautoberfläche über dem zu behandelnden Gebiet angesetzt und ein langwelliger Druckpuls in den Körper eingeleitet. Anders als bei den kurzwelligen SW ist wegen der großen Pulslänge und der begrenzten Ankopplungsfläche keine Fokussierung im Gewebe möglich, da, physikalisch gesehen, der Applikator deutlich größer als die Pulslänge sein müsste und selbst dann der Fokus unter realistischen Bedingungen nicht kleiner als eine Pulslänge (15-150 cm) sein kann. Der eingeleitete Druckpuls breitet sich daher radial ausstrahlend im Gewebe aus und verliert mit zunehmendem Abstand schnell an Intensität. Die Wirkung der DW ist damit besonders in oberflächennahen Gewebestrukturen zu finden.

Zusätzlich zu dem beschriebenen niederfrequenten Druckpuls ist in der Regel eine mittelfrequente Oberschwingung zu beobachten, die im Bereich von 100 kHz liegt. Es handelt sich hierbei um eine im Stempel angeregte Dichtewelle (Stabwelle), die sich ebenfalls ins Gewebe ausbreitet.

Trotz der um mindestens den Faktor 10 geringeren Druckwerte zeigen DW ebenfalls eine stimulierende Wirkung im Gewebe. Die in einem Puls enthaltene Energie erreicht nämlich Werte, die nicht sehr weit von denen der SW abweichen. Die vergleichsweise lange Pulsdauer der DW kompensiert weitgehend den reduzierenden Einfluss der gerin-

geren Druckamplitude. Die in der praktischen Anwendung fehlende Fokussierbarkeit der DW beschränkt die Anwendung jedoch auf oberflächennahe Strukturen, wodurch die Indikationsbereiche für SW und DW sich nur in oberflächennahen Gewebereichen überlappen.

Als Wirkungsmechanismus für beide Wellentypen vermutet man eine Mechanotransduktion der akustischen Energie auf verschiedene Membranen, derart, dass die Durchlässigkeit für unterschiedliche Moleküle und Ionen temporär modifiziert wird und in der Folge davon verschiedene biochemische Umbauprozesse initiiert werden. Auf dem gleichen Effekt der Wirkung auf Zellmembranen beruht auch die Möglichkeit, Nervenzellen in der Peripherie zu stimulieren und eine Reizfortleitung in höhere neuronale Zentren zu aktivieren. Eine Reorganisation des Schmerzgedächtnisses durch repetitiv applizierte SW oder DW scheint damit als ein möglicher Mechanismus denkbar zu sein. Eine besondere Art der Gewebestimulation lässt sich erreichen, wenn die Repetitionsfrequenz der applizierten Druckwellen auf Werte von größer 20 Pulse/Sekunde gesteigert wird. Man kommt damit in den Resonanzbereich von Muskelfasern, die in starke Vibrationen versetzt werden und sich so von Verklebungen und Verhärtungen befreien lassen.

Stoßwellen-Stimuli induzieren Selbstausheilung

Medizinische Aspekte der Stoßwellenapplikation

Mechanotransduktion, Tensegrity

In Zellkulturen konnte durch mechanischen Stress experimentell eine Abflachung der Zellen mit

nachfolgenden Zellteilungen und Proliferation provoziert werden. Bilden sich jedoch kugelförmige Reaktionen nach Stress, erfolgt ein Absterben der Zellen. Bei der Zellteilung und damit bei Heilungsprozessen ist atmosphärischer Druck allein schon ein gewichtiger Faktor. Klinisch ist die Bedeutung des Drucks bei stabilisierenden Osteosynthesemaßnahmen bekannt.

Mechanische Stimuli extrakorporal erzeugter SW werden im Bindegewebe der extrazellulären Matrix in chemische bzw. molekularbiologische Signale transformiert, die dann über Integrine (Rezeptoren der Zellmembran) und das Zytoskelett in den Zellkern geleitet werden, wo eine Gentranskription und Genexpression induziert werden.

Für extrakorporale SW konnten NEULAND u.a. den Nachweis der Mechanotransduktion genannten Signalkaskade durch Generierung sog. second messengers erbringen, deren Konzentration abhängig ist von der Reaktion der Integrine. Die Mechanotransduktion wird beeinflusst durch Frequenz, Druckamplitude, Intensität und Dauer der SW.

Zur Aufrechterhaltung einer physiologischen Festigkeit und zur Gewebeerneuerung ist die Einwirkung von Druck- und Zugkräften auf die Fasern der extrazellulären Matrix (EZM) erforderlich. Die EZM besteht aus einem siebförmigen molekularen Polysaccharidnetz, das als Transitstrecke zwischen Kapillaren und Zellen und umgekehrt dient. Die gegenwärtige Matrixforschung geht davon aus, dass jede Zellfunktion von der Struktur und Funktion der EZM (Grundsubstanz) und ihrem Anschluss an die Endstrombahn sowie das Hormon- und Nervensystem abhängt. Das Bindegewebe ist eine

Mittlersubstanz zwischen Haut, Knochen, Blutgefäßen, Nerven und Muskeln. Schon normale Bewegungen der Gelenke rufen eine Zugspannungs- und Druckveränderung der Haut, der extrazellulären Grundsubstanz und der (Muskel)-Zellen hervor. Die mechanische Energie von Stoß- und Druckwellen kann bei dieser Vorstellung über die EZM auf Zellen Einfluss nehmen. Durch Mechanotransduktion können auf diesem Wege degeneriertes Sehnen- und Fasziengewebe, Pseudarthrosen, Hüftkopfnekrosen, eine Osteochondrosis dissecans, ein arterielles Ulcus oder eine Muskelverklebung im Sinne eines myofascialen Triggers zur Regeneration bzw. Ausheilung kommen.

Die aus der Technik bekannten Prinzipien des Tensegrity-Modells (R. B. FULLER) mit Selbststabilisierung der statischen und elastischen Elemente, die miteinander im Gleichgewicht stehen, sind theoretisch auf die Humanbiologie anzuwenden. Knochen und Muskeln nehmen den Druck auf, die elastischen Verbindungen der Muskelketten die Zugkräfte. Der Molekularbiologe D. INGBER definiert durch seine Entdeckungen das Zytoskelett neu. Er fand auch in den Körperzellen elastische und starre Strukturelemente, so dass auch hier die Tensegrity-Prinzipien gesichert wurden. Die durch Stoß- und Druckwellen ausgelöste Mechanotransduktion könnte im Krankheitsfalle – wenn also das Gleichgewicht gestört ist – Einfluss auf die Rückstellfähigkeit des Gewebes nehmen und es in den elastischen Bereich zurückführen.

Anwendung fokussierter Stoßwellen

In der Orthopädie werden heute extrakorporal erzeugte Druckpul-

SPECIAL: STOSSWELLEN • SPECIAL: STOSSWELLEN • SPECIAL

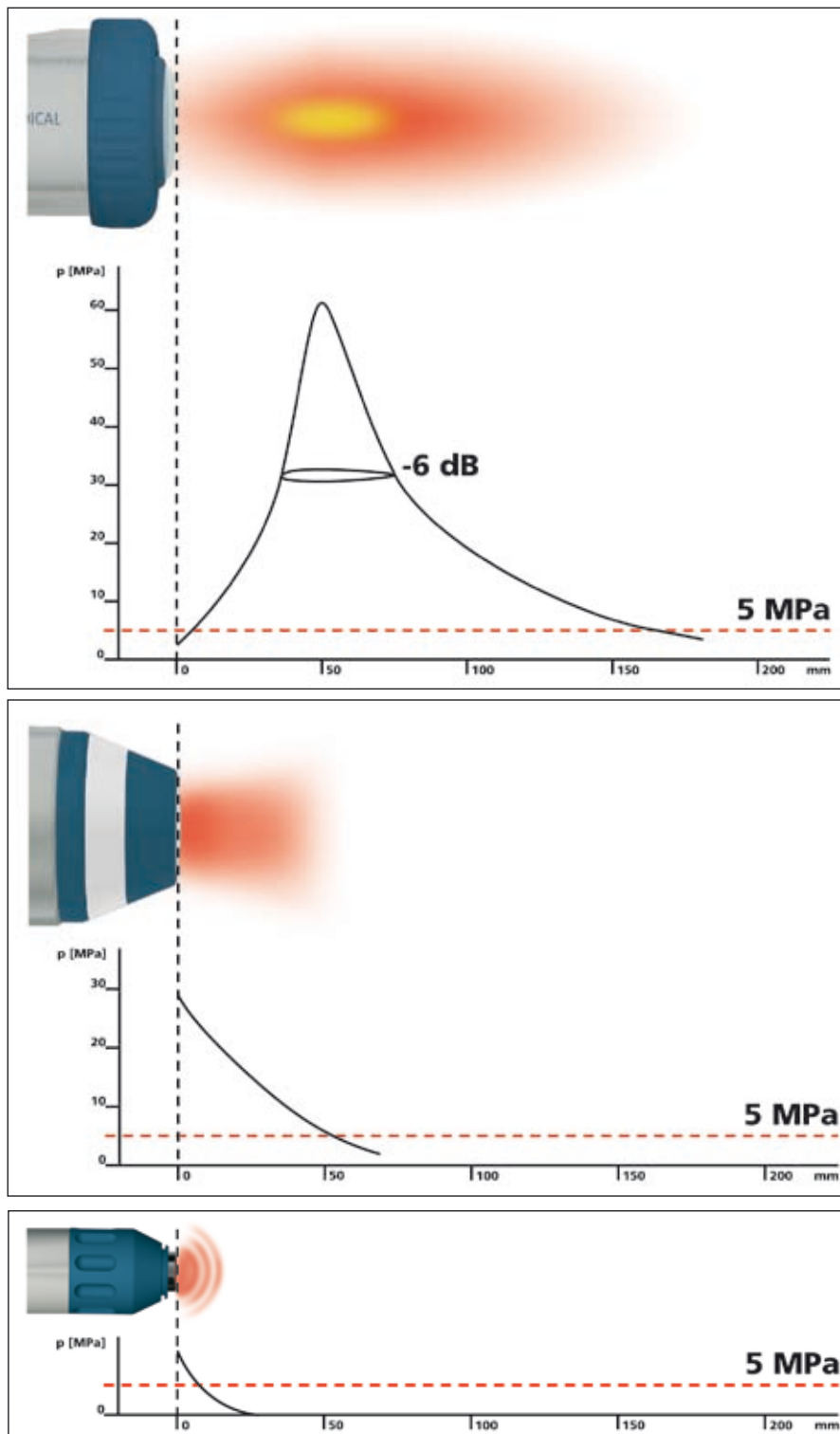


Abb. 1: Vergleich verschiedener Stoß- und Druckwellenköpfe anhand der Druckamplituden (schematisch) a: fokussiertes Stoßwellenfeld mit gezielter Wirkung in der Tiefe, b: planares Stoßwellenfeld (unfokussiert) mit flächenhafter Wirkung im Koppelbereich, c: radiales Druckwellenfeld mit punktueller Wirkung an der Oberfläche.

Zu beachten ist, dass die Druckamplitude allein kein Maß für die biologische Wirksamkeit ist. Auf Grund der längeren Pulsdauer besitzt auch die radiale Druckwelle trotz geringerer Druckamplitude eine gute Wirksamkeit, die aber auf oberflächliche Gewebereiche beschränkt ist.

se zur Gewebe-Regeneration genutzt. Physikalisch wird zwischen SW und DW unterschieden. Beide haben ihren Stellenwert in Klinik und Praxis.

Auf Grund ihrer Kurzwelligkeit sind extrakorporal erzeugte SW fokussierbar und tiefenwirksam. Mit Hilfe unterschiedlicher Vorlaufstrecken kann die Eindringtiefe variiert und der Gewebeebe angepasst werden.

Klassische Krankheitsbilder für die fokussierte SW mit wissenschaftlichen klinischen Studien sind Tendinosis calcarea, die Epicondylitis radialis, die Fasciitis plantaris und die Pseudarthrose. Nach Reizung und Schädigung von nozizeptiven C-Fasern mit niederenergetischen SW konnten tierexperimentell und durch klinische Studien Neuropeptide nachgewiesen werden. Der Effekt einer nachfolgenden protrophischen Entzündung wirkt sich dabei günstig auf die Ausheilung von Enthesiopathien aus.

Immer häufiger werden fokussierte SW zur Diagnostik und Behandlung des myofaszialen Triggerpunktsyndroms eingesetzt. Sie sind vorteilhaft beim Aufsuchen des Projektions- und Wiedererkennungsschmerzes und ermöglichen eine gezielte Behandlung von Triggerpunkten. Knotige Verklebungen der Sarkomere und Strangbildungen werden gelöst und nozizeptive Afferenzen gehemmt.

Anwendung planarer Stoßwellen (SW)

Durch Einsetzen akustischer Spiegel oder Linsen kann die räumliche Druckverteilung von SW verändert werden. Planare (defokussierte) SW, die eine geringere Eindringtiefe haben, werden in oberflächlichen Gewebeschichten appliziert. Erste Erfolge verzeichnen einige Autoren bei

Brandwunden, Wundheilungsstörungen und Ulzerationen bei AVK oder Diabetes mellitus. Die Wirksamkeit von SW bei diesen Krankheitsbildern könnte mit der Mechanotransduktion erklärt werden. Theoretisch vorstellbar ist daher der Einsatz planarer SW bei Distorsionen und kleineren Traumen.

divergieren und ihre Energiedichte mit radialer Ausbreitung verlieren. Häufig wird auch der Begriff „radiale Stoßwelle“ verwendet, obwohl dieser Begriff physikalisch nicht korrekt ist (s.o.). Weil die heute medizinisch genutzten Druckpulse wesentlich langwelliger sind, können sie nicht in der Tiefe des Gewebes fokussiert werden. Ihre Eindringtiefe liegt

dylitis radialis und ulnaris, dem Patellaspitzen- und Schienbeinkantensyndrom und auch dem Fersensporen. Wegen ihrer Oberflächenwirkung erscheint eine Behandlung mit DW speziell bei diesen Krankheitsbildern sinnvoll. Die Wirksamkeit von SW und DW wird durch eine Lokalanästhesie (verminderte Freisetzung von protrophen Neuropeptiden) nachweislich erheblich reduziert. Eine Lokalanästhesie wird deshalb in aller Regel nicht mehr durchgeführt. Ohne Lokalanästhesie können knochen-nahe Druckwellenbehandlungen aber wegen heftiger Behandlungsschmerzen problematisch werden.

Bei der Behandlung muskulärer Triggerpunkte stellt sich die Frage der Eindringtiefe. Bei oberflächlicher Lage helfen radiale DW, bei tiefer liegenden Muskeln sind nach hiesiger Erfahrung fokussierte SW vorzuziehen.

Physikalisch gesehen dringen radiale DW nur oberflächlich ein. Sie besitzen jedoch einen medizinischen Effekt. Die von einem Applikatorkopf mit einem breiten Durchmesser ausgehenden Oszillationen könnten die Spannungskräfte und den Druck in der EZM durch biochemische Modulation verändern. Das Bindegewebe und speziell das des Endomysiums sind dabei als „Resonanzboden“ aufzufassen. Dieser Modellvorstellung entsprechend wirken die Schwingungen auf die Mechano- und Dehnungsrezeptoren der Muskulatur und beeinflussen damit ihren Tonus.

Die radialen DW hätten so eine indirekte Wirkung, die tiefer reichenden fokussierten SW dagegen einen mittelbaren Effekt auf die Muskelzellen.

Bis zu 30 Hz beträgt der physiologische Muskelzittern zur Regulierung des Blut- und Lymphabflusses. Er ist bei Triggern er-



Abb. 2: DUOLITH SD1-Kombinationsgerät für die Stoß- und Druckwellentherapie

Anwendung radialer Druckwellen (DW)

Die medizinisch verwendeten DW werden auch *radiale* DW genannt, weil sie nach Einleitung

bei 1 bis 3 cm. Radiale DW haben eine Oberflächenwirkung an der Ansatzstelle des Applikators. Berichtet wird über erfolgreiche Behandlungen bei der Epicon-

heblich reduziert. Vibrationen in einer optimalen Größenordnung von mehr als 20 Hz und deren Resonanzen lösen bei theoretischer Betrachtung muskuläre Verklebungen über Signalkaskaden der Mechanotransduktion. Lymph- und Blutabfluss werden gesteigert, der Stoffwechsel verbessert.

Mechanorezeptoren/Propriozeptoren, auch A-Betafasern genannt, werden aktiviert, tragen zu einer Bewegungszunahme bei und hemmen so auf Rückenmarksebene nozizeptive Afferenzen. Durch den in der EZM bestehenden Anschluss an das Nervensystem kann analog zur Akupunktur und zum sog. Dry-Needling eine Gegenirritation durch die fokussierten SW oder die radialen DW erfolgen. Im Sinne der Schmerztherapie geht dies einher mit einer Verkleinerung der rezeptiven nozizeptiven Felder.

Parallelen zur Vibrationstherapie

Zur Vermeidung der Osteoporose bei russischen Astronauten begegnete NAZAROV dem Schwund von Muskelmasse mit der Vibrationstherapie. RUBIN berichtet über diese Form einer effektiven Behandlung und benutzt dabei eine Frequenz von ungefähr 35 Hz mit einer Schwingungsamplitude von 50 Mikrometern (Dicke eines menschlichen Haares). Diese Erkenntnisse lassen sich auf die extrakorporal erzeugten Druckwellen, die mit einem oszillierenden Applikatorkopf bei > 20 Hz erzeugt werden, übertragen.

Behandlungsregime

Auf die biologische Zellerneuerungsfähigkeit durch Stoßwellen hat ROMPE bereits verwiesen. Eine Energieflussdichte von 0,25 mJ/mm² sollte bei Weichteil-

behandlungen nicht überschritten werden. Bis zu 0,15 mJ/mm², 1500 bis 2000 Impulse und 3 bis 4 Sitzungen insgesamt, mit wöchentlichen Intervallen, nennt er beispielhaft für die Epicondylitis.

Die Ortung durch bildgebende Verfahren (Röntgen oder Ultraschall) spielt eine Rolle bei der Behandlung von Knochendefekten (Pseudarthrosen). Bei Enthesiopathien kann auf eine kostspielige bildgebende Ortung verzichtet werden, wenn der Behandlungsort durch Patienten-Feedback bestimmt wird. Durch eine scannende Bewegung des Therapiekopfes wird während der Behandlung der Punkt höchster Schmerzempfindung aufgesucht.

Der Grundsatz gilt, ein Zuviel zerstört die biologische Fähigkeit der Gewebeerneuerung. Bei radialen DW sollten durch Anwendung niedriger Druckamplituden Hämatome vermieden werden. Eine große Auflagefläche des Schwingkopfes verhindert diese und ist darüber hinaus günstig für die Übertragung von Oszillationen.

Der Effekt der Mechanotransduktion wird bei defektem Zytoskelett verhindert. Die Ergebnisse der Pseudarthrosenbehandlung durch SW wurden besser durch Reduktion der Energie und der Impulszahlen (SCHADEN).

Die Frage nach der optimalen Reputationsfrequenz für radiale DW scheint unter Berücksichtigung der Forschungen von NAZAROV und RUBIN bei der muskulären Triggerbehandlung mit mehr als 20 Hz beantwortet.

Unter der Vorstellung der direkten tiefen Wirkungsweise der SW und dem Aspekt der Erhaltung des biologischen Prinzips der Mechanotransduktion ist hier eine Frequenz von 4 Hz zu empfehlen.

Fazit

Stimuli extrakorporaler fokussierter Stoßwellen (SW) und radialer Druckwellen (DW) wirken auf die extrazelluläre Matrix und führen durch Mechanotransduktion zur Gewebeerneuerung und Regeneration. Eine Schädigung des Zellskeletts ist zu vermeiden, um die biologische Reaktionsfähigkeit zu erhalten, da sonst keine Informationen von der EZM über die Rezeptoren der Zellmembran an den Zellkern gelangen können. Energie, Druckamplitude, Intensität und Frequenz der Stoßwellen spielen deshalb eine ganz entscheidende Rolle. Die tiefe Eindringfähigkeit fokussierter SW lässt eine direkte Behandlung verschiedener Gewebeschichten durch variierende Vorlaufstrecken zu. Radiale DW wirken indirekt. Die oberflächlich eingebrachten Oszillationen verursachen Resonanzen in der extrazellulären Matrix, wo sie in Form von biomolekularen Signalen wirksam werden. Dem physiologischen Muskeltremor entsprechend bieten sich dafür Frequenzen von mehr als 20 Hz an.

¹ Peckhauser Straße 32, 40822 Mettmann, Deutschland, E-Mail: praxis-dreisilker@web.de

²Storz Medical AG, Lohstampfestrasse 8, 8274 Tägerwilten, Schweiz, E-Mail: info@storzmedical.com

Literatur beim Verfasser

Anschrift für die Verfasser:

Dr. med. Ulrich Dreisilker, Peckhauser Straße 32, 40822 Mettmann, Deutschland, E-Mail: praxis-dreisilker@web.de □