

Entwicklung von Aktoren und Verbrauchsmodulen für die multiple Funktion der Haut

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Dirk Scherkowski
aus Berlin

von der Fakultät V - Verkehrswesen und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Henning J. Meyer (TU Berlin)
1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Lehr (TU Berlin)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Kai Schauer (HTW Berlin)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12. Oktober 2012

Berlin 2012

D 83

- Manfred, Marianne und Ines gewidmet -

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mikrotechnik des Instituts für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik der Fakultät V (Verkehrs- und Maschinensysteme) der Technischen Universität Berlin und als Entwicklungsingenieur der Firma MT.DERM GmbH Berlin, größtenteils im Rahmen eines EU-geförderten (EFRE) Forschungsprojekts zu intradermalen DNS-Impfanwendungen.

Prof. Dr. rer. nat. Heinz Lehr möchte ich für die engagierte Betreuung und die konstruktiv-kritische Durchsicht meines Manuskripts sowie die familiäre Atmosphäre in der Zusammenarbeit und die vielen Gespräche danken, die weit über das Fachliche hinausgingen. Seiner Frau, Dr. med. Helena Lehr, danke ich für ihren unermüdlichen Einsatz für die alltäglichen Belange des Fachgebiets, für ihre Korrekturen am Layout meines Manuskripts sowie ihre Beratung über fachliche Fragen hinaus. Beider, an Selbstaufgabe grenzender Hingabe zum Beruf und ihr Streben nach Aktualität wird mir stets ein Vorbild sein. Ich danke allen Kollegen am Fachgebiet sowie bei MT.DERM für die herzliche Aufnahme in ihrer - meiner - Arbeitsfamilie und die dabei erlebte angenehme Atmosphäre. Ganz besonderer Dank gilt meinem Teamkollegen Dr.-Ing. Andreas Loth für die freundschaftliche Zusammenarbeit, den Studenten Jan Höfer, Andreas Bobrowski, Roman Baumann, Leslie Landmann und Sophia Scholz für die Unterstützung meiner Arbeit durch ihre Studien-, Projekt- und Diplomarbeiten und dem Team der feinmechanischen Werkstatt unter der Leitung von Meister Detlef Schnee für die großartige Unterstützung, Beratung und die präzise Umsetzung meiner Ideen. Großer Dank gilt der Firma MT.DERM, insbesondere Herrn Dipl.-Kfm. Jörn Kluge (CEO) für die Unterstützung bereits während meines Studiums sowie Herrn Kornelius Knothe für die großartige Zusammenarbeit über das Dienstliche hinaus. Ich danke meinen unvergessenen Lehrern, die ehemals die solide Basis der polytechnischen Allgemeinbildung gelegt und die immer daran geglaubt haben, dass „aus ihrem Dirk mal was wird“. Auch im privaten Umfeld bedurfte es einer immensen Unterstützung. Ich möchte meinen vielen, wirklich guten Freunden und damit Begleitern meiner bisherigen Bildungsreise danken, die mit mir das Werden und Gedeihen der Studienteile miterlebt haben. Insbesondere danke ich Prof. Harald Scheel, den ich hier explizit - gemäß einer historischen Parallele und einer gemeinsamen Absprache - „als Randnotiz“ erwähnen möchte. Danke, Harry, für alles - und Deinen erfrischenden Schalk! Meiner Familie und insbesondere meinen Eltern möchte ich danken für die unermüdliche Unterstützung und den nie versiegten, fortwährenden Glauben an das Erreichen meiner Ziele. Ohne sie wäre es unmöglich gewesen, die vielen Stationen motiviert zu bewältigen und die gesteckten Ziele nicht aus den Augen zu verlieren. Um sie und meine Frau zu ehren und sie mit Stolz auf das Erreichte und die gewordene Persönlichkeit zu erfüllen, habe ich überhaupt den steinigen Weg des Studiums mit dem hohen Ziel der Promotion beschritten. Abschließend, und doch vor allen anderen, möchte ich meiner lieben Frau Ines in tiefer Liebe danken. Sie hat mich in all den Jahren meiner Studienreise mit ihrer liebevollen und schmiegsamen Seele getragen und begleitet und mit mir die Entbehrungen eines Studentenhaushalts durchlebt sowie die dafür notwendigen Visionen geteilt. Ich darf sie, als größtes Geschenk, nicht nur meine Frau, sondern auch meinen besten Freund nennen. Götterfunke!

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Medizinische und kosmetische Grundlagen	5
2.2	Mathematische Grundlagen	14
2.3	Stand der Technik	17
3	Das Gewebeausweichen beim Punktieren von menschlicher Haut	39
3.1	Reduktion oder Vermeiden des Ausweichens.....	39
3.2	Vorhalten durch prädiktives Beschreiben des Ausweichens	40
3.3	Erreichen der Penetrationstiefe trotz Ausweichens.....	40
4	Entwicklung von Konzepten zur Beherrschung des Hautausweichens	42
4.1	Ansatz: Stechgeschwindigkeit	42
4.1.1	Versuche zum Einfluss der Stechgeschwindigkeit	44
4.1.2	Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 1: Kurbeltrieb mit vergrößertem Hub	52
4.1.3	Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 2: Stabkurbeltrieb	55
4.1.4	Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 3: Querkurbeltrieb	63
4.1.5	Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 4: Federaktoren.....	88
4.2	Ansatz: Hautelastizität	107
4.2.1	Hautvorspannung durch aktiven Energieeintrag.....	107
4.2.1.1	Hautauflage mit ringwirbelartig rotierender Feder	108
4.2.1.2	Spreiz- oder Greif-Modulspitze	109
4.2.1.3	Luftdruck-basierte Konzepte.....	110
4.2.2	Vorspannung durch flaches Kamm- oder Gegenstechen.....	115
4.2.3	Hautvorspannung durch passive Komponenten.....	124
4.2.4	Aufbringen einer Versteifungsschicht	127
4.3	Ansatz: Verringerte Interaktion zwischen Nadel und Haut	130
4.4	Ansatz: Kompensation des Hautausweichens	135
4.5	Ansatz: Schwingfähiges System „Haut“ erschließen.....	140
5	Bewertung der Konzepte	146
6	Zusammenfassung und Ausblick	155
7	Literaturverzeichnis	159

8	Anhang	162
8.1	QKT-Variante 1	162
8.2	QKT-Variante 2	165
8.3	QKT-Variante 3	166
8.4	QKT-Variante 4	168
8.5	QKT-Variante 5	170
8.6	QKT-Variante 6	171
8.7	QKT-Variante 7	174
8.8	QKT-Variante 8	176
8.9	QKT-Variante 9	179
8.10	Detaillierte Ziel-Kriterien-Struktur zur Konzeptbewertung.....	182
8.11	Paarvergleichsmatrix für die Hauptziele.....	185
8.12	Paarvergleichsmatrizen für die Zielbereiche 1x bis 4x.....	185
8.13	Paarvergleichsmatrizen für die Kriterien 11.x bis 48.x.....	187
8.14	Detaillierte Ergebnisse der Konzeptbewertung.....	193

1 Einleitung

Das gesellschaftliche Miteinander sozialisiert lebender Menschen schließt seit jeher Manipulationen an der eigenen oder fremden, physischen oder psychischen Konstitution ein. So werden die äußere oder innere, fremde oder eigene Wahrnehmung, die körperliche oder seelische Gesundheit und der Geisteszustand durch die Zuhilfenahme von dem Körper zugeführten Substanzen oder Gegenständen oder das Herbeiführen besonderer Situationen gezielt beeinflusst. Meist stehen dabei positiv erlebte Veränderungen im Vordergrund. Begriffe wie Körperschmuck, Drogen, Fetisch, Trance oder meditative Zeremonien sind dafür nur einige Beispiele, die sich weiter aufteilen lassen: Körperschmuck umfasst neben Kleidung, Schuhen, Haartracht auch Accessoires wie Schmuck, Farben, dekorative Hautbilder, Stammes- und Würdenzeichen. Drogen erinnern an Rauschgifte und Medikamente, Pflanzen- oder Heilextrakte. Fetische an emotional begleitete Handlungen, Kleidungen, Gegenstände oder Situationen und vieles mehr.

Dabei zielen die methodisch unterschiedlichsten Manipulationen auf die Erhaltung, Wiederherstellung oder Verbesserung der Gesundheit und der Ästhetik ab. Sie lassen sich unter den im heutigen Sprachgebrauch vertrauten Begriffen „Medizin“ oder „Kosmetik“ zusammenfassen. Bei einer großen Zahl der manipulativen, medizinischen und kosmetischen, Handlungen wird dazu insbesondere die Haut des Menschen beeinflusst, um das äußere Hautbild und dessen Eigen- und Fremdwahrnehmung zu verbessern, da vor allem letztere eine wichtige Rolle bei der nonverbalen Kommunikation spielt. So wird in Bruchteilen von Sekunden ein ganzheitlicher Eindruck von der Gesundheit, dem Alter oder den Lebensumständen vermittelt, der die Möglichkeiten und den weiteren Verlauf der Kommunikation und des Interagierens entscheidend bestimmt - und gegebenenfalls begrenzt. Es entsteht der Eindruck, dass seit jüngster Vergangenheit und mit steigender Tendenz von der Wirtschaft und den Medien Anstrengungen unternommen werden, um ein möglichst optimales äußeres Erscheinungsbild der gesamten Person und insbesondere der Haut zu ermöglichen. Als Beispiel seien die Vielzahl der Styling-, Model- und Modeshows sowie der Angebote für die persönliche Fitness genannt.

Neben den nicht invasiven Maßnahmen, das Hautbild positiv zu verändern (Make-Up, Cremes, Lotionen, Peelings) werden zunehmend aktiv unterstützte, invasive Methoden angewendet, um die Wirkung des grundlegenden Verfahrens zu verbessern und den Erfolg der Behandlung zu verlängern. Dabei verschwimmen die Grenzen zur Medizin immer mehr, nicht zuletzt, weil die Haut in der jüngsten Vergangenheit wegen der besser verstandenen Rolle in der körperlichen Ganzheit in den Fokus medizinischer Forschung gerückt ist. Als Beispiel für eine Schnittmengenbildung sei an das Anbringen dekorativer Verletzungen aus kosmetischen Gründen, die bis tief in die Dermis reichen, z.B. durch Cutting oder Branding (Schmucknarbenbildung durch Schnitte oder Brandverletzungen), oder an das intradermale Eintragen von die Struktur verbessernden oder verjüngend wirkenden Substanzen erinnert. Betrachtet man die Vielzahl der an der Haut vorgenommenen invasiven Handlungen panoptisch, lässt sich feststellen, dass meist punktförmige Verletzungen der Haut, so genannte Punktionen, gesetzt werden, z.B. zur Gewinnung von Gewebe- oder Blutproben, zum Einbringen von Wirkstoff-

lösungen oder von Pigmentdispersionen, wie beim Tätowieren oder Anbringen von Permanent-Make-Up, oder zur Anregung von Stoffwechselfvorgängen.

Beim Punktieren der Haut werden möglichst geeignete Anordnungen spitzer bis scharfer Werkzeuge verwendet, beispielsweise Nadeln, Kanülen oder Lanzetten. Wie jeder zähe Werkstoff weicht auch die Haut der vordringenden, trennenden Werkzeuggeometrie teilweise aus, bevor diese in das Gewebe eindringt. Dieses Ausweichen stellt jedoch eine Störgröße beim Erreichen des Sollwerts Punktionstiefe dar - insbesondere bei Behandlungen, bei denen man eine Applikation innerhalb einer bestimmten Hautschicht und -tiefe fordert. Gelingt es, durch geeignete Maßnahmen die zu applizierende Substanz in der richtigen Hautschicht abzugeben, steigen die Effektivität und damit der Erfolg der Behandlung.

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Entwicklung und Untersuchung von Verfahren, Aktoren oder Verbrauchsmodulen, die das Hautausweichen beim Punktieren - den so genannten Umbrella-Effekt - vermindern oder vollständig verhindern, ohne dabei wesentlich in den gewohnten Behandlungsablauf einzugreifen. Hierzu wurden Einflussparameter des Hautausweichens identifiziert, darauf aufbauende Konzepte entwickelt und dabei eine praktische und ökonomische Umsetzbarkeit sowie eine Praxistauglichkeit der Konzepte angestrebt. Einige der entwickelten Methoden überragen den Stand der Technik in erfinderischer Höhe und motivierten mehrere Schutzrechtanmeldungen, viele weisen ein hohes Produktpotenzial auf.

Die Gliederung der Arbeit lässt sich wie folgt beschreiben: Ausgehend von den wissenschaftlichen Grundlagen wird in Beispielen über den aktuellen Stand der Technik beim Hautpunktieren informiert. Anschließend werden die Einflussparameter des Hautausweichens diskutiert und die daraus abgeleiteten Konzepte, die durchgeführten Versuche, die entwickelten Prototypen, die daran durchgeführten Messungen sowie die Ergebnisse vorgestellt und einer Bewertung unterzogen. Eine Zusammenfassung gibt einen abschließenden Überblick über den Inhalt und den Umfang der Arbeit. Im Anhang sind wichtige zu dokumentierende Zwischenschritte und Ergänzungen zur eigenen Vertiefung enthalten, die den eigentlichen Rahmen der Arbeit und deren Übersichtlichkeit sprengen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden ausgewählte Grundlagen zusammengestellt, auf deren Fundament die Argumentationen in dieser Arbeit gründen.

2.1 Medizinische und kosmetische Grundlagen

Das Eintragen von Substanzen in die Haut steht besonders bei modernen medizinischen oder kosmetischen Behandlungen im Vordergrund. Die Haut als ein „Barriere“-Organ des Körpers weist viele Vorteile für bestimmte medizinische Behandlungskonzepte auf: sie ist einfach zugänglich, großflächig, gut durchblutet und durchlympt, weist eine hohe Anzahl an immunkompetenten Zellen auf, wird über die angeschlossenen Lymphabflusswege und die Vielzahl der darin eingeschalteten Lymphknoten vom Immunsystem praktisch ständig überwacht und spielt eine wichtige Rolle für das Wohlbefinden und die seelische Verfassung. Zudem lassen sich Hauterkrankungen bei lokaler Wirkstoffapplikation mit hohen Wirkstoffkonzentrationen behandeln, ohne dabei den möglicherweise sonst gesunden Körper unnötig belasten zu müssen. Aktuell nutzen beispielsweise moderne Impfverfahren die Haut als Applikationsort, um einige bekannte Impfrisiken und -nebenwirkungen, z. B. die Gefahr des Spritzenabszesses bei intramuskulärer Injektion oder den Muskelschmerz noch Tage nach der Impfung reduzieren oder vermeiden zu können. Ein aktuelles Beispiel ist der von der Firma Sanofi Pasteur in einer Intradermalspritze angebotene Influenza-Virus-Impfstoff Fluzone®, siehe Abbildung 2-1.



Abb. 2-1 Intradermale Applikation des Impfstoffs Fluzone® [SaPa12]

Die Rolle der Haut für das persönliche Wohlbefinden ist unbestritten. Daher streben viele kosmetische Behandlungen eine Verbesserung des Hautbilds und die gezielte Beeinflussung der äußeren Erscheinung, bzw. der Fremdwahrnehmung des Körpers an. Neben den äußeren Anwendungen, wie Lymphdrainagen, Hautmassagen, Peelings oder ähnlichem, werden auch invasive Behandlungsmethoden eingesetzt, um die Hautbeschaffenheit in gewünschter Weise zu beeinflussen. Zum Beispiel lassen sich durch Pigmentierung dauerhafter Körperschmuck und Permanent-Make-Up erzeugen. Dasselbe gilt für das Überdecken von Pigmentstörungen, von Malen oder von durchscheinenden, störenden Haut- und Gefäßveränderungen. Auch bei Verjüngungsbehandlungen oder bei Strukturveränderungen von Haut und Hautersatzgewebe

nach Operationen, Verbrennungen oder sonstigen Hautverletzungen wird die Haut invasiv behandelt. Neben der kosmetischen Pigmentierung wird die so genannte Mesotherapie angeboten, bei der verschiedenste Stoffe, wie Vitamine, Mineralien, ausgewählte Wachstumsfaktoren oder Proteinzubereitungen in die mittlere Hautschicht (lateinisch „meso“ = mittlere) abgegeben werden.

Prinzipiell wird für die invasive Behandlung der Haut meist eine definierte Stechtiefe gewünscht, um den Behandlungserfolg prädiktier-, quantifizier- und vor allem reproduzierbar gestalten zu können. Dabei hat jedes Verfahren eine optimale Penetrationstiefe und ein zugehöriges Toleranzintervall. Nicht jede Behandlung geht jedoch einher mit einem zeitgleichen oder zeitversetzten Substanzeintrag. Vor allem bei bestimmten kosmetischen Behandlungen werden allein durch die Penetration und die dabei erfolgende mechanische Beanspruchung der Haut Stoffwechselfvorgänge angeregt, die über eine vorzeitige Erneuerung des Bindegewebes ein jüngeres Aussehen bewirken sollen. Dieses Anwendungsbeispiel verdeutlicht, dass eine eng tolerierte Stechtiefe nicht allein durch eine schichtgenaue Wirkstoffapplikation motiviert ist.

Zum Verständnis der folgenden Ausführungen werden vorgangsbezogene Begriffe, wie der Nadelherausstand, der Nadelhub, die Nadel- oder Stechgeschwindigkeit, die Stechtiefe oder die Einstechgeschwindigkeit definiert, da diese vor allem von populärwissenschaftlich gebildeten Anwendern teilweise synonym verwendet oder mit eigenen Bezeichnungen belegt werden.

Nadelherausstand: In der Regel weisen maschinelle Stechgeräte eine Einstellmöglichkeit für die maximale Länge der während der Nadelbewegung aus dem Gerät ragenden Nadelabschnitte, für den so genannten Nadelherausstand, auf. Der Wert wird von der vorderen Gehäuseseite zur Nadelspitze in normaler (senkrechter) Richtung gemessen. Da üblicherweise die Nadel am Ende jeder Bewegung wieder vollständig in das Gerät zurückgezogen wird, ist mit Nadelherausstand lediglich der Maximalwert gemeint. Dieser kann einige Millimeter betragen (ca. 3 bis 5 mm). Der Begriff Herausstand legt nahe, dass keine negativen Werte erwartet werden.

Hub, Nadelhub: Der Hub bezeichnet den Abstand zwischen vorderem und hinterem bzw. zwischen oberem und unterem bzw. zwischen äußerem und innerem Totpunkt der Nadelbewegung, gemessen in normaler Richtung. Der Hub ist, im Gegensatz zum Nadelherausstand, bei bisher verfügbaren Geräten nicht einstellbar. Er kann gleich dem Nadelherausstand sein, aber auch größer, wenn ein Teil der Nadelbewegung innerhalb des Stechgeräts ausgeführt wird, oder selten kleiner, wenn die Nadelspitze nicht vollständig in das Gehäuse zurückgeführt wird.

Nadelgeschwindigkeit: Die Nadelgeschwindigkeit ergibt sich aus der Frequenz und damit über die auf eine einzelne Nadelbewegung entfallende Periodendauer sowie bei linearen Stechbewegungen über den Hub als dem während einer Periode zurückgelegten Weg, wobei die Verteilung der Nadelgeschwindigkeit über dem Nadelweg eine Aussage darüber liefert, wie das Stechgerät am besten zu verwenden ist, um möglichst gute Behandlungsergebnisse zu erzielen. Der Kurvenverlauf hängt wesentlich vom Antriebskonzept und den Fertigungstole-

ranzen, dem Schwing- und Regelverhalten der Energieversorgung sowie zusätzlichen (Rückstell-, Betriebs-) Elastizitäten beim einsatzbereiten Stechgerät ab.

Ein- und Stechgeschwindigkeit: Wenn das Stechgerät für eine Stechbewegung in Gewebe, beispielsweise in Haut, verwendet wird, kann für die Dauer der Nadel-Gewebe-Interaktion von einer Stechgeschwindigkeit, während des Leerlaufs lediglich von einer erzielbaren Stechgeschwindigkeit gesprochen werden. Abhängig davon, welches Antriebskonzept vorliegt und in welchem Abstand zum hinteren / inneren / unteren Totpunkt die Nadelspitze auf die Hautoberfläche trifft, weist sie unterschiedliche Einstechgeschwindigkeiten auf. Streng genommen müsste von Auftreffgeschwindigkeit gesprochen werden, da die Nadelspitze nur selten in diesem Moment beginnt, in das Gewebe einzudringen. Vielmehr findet eine gewisse Mitbewegung Haut / Nadel statt, bevor im Anschluss daran das Eindringen der Nadel in die Haut und damit eine Relativbewegung zwischen der Haut und der Nadel mit der eigentlichen Stechgeschwindigkeit erfolgt.

Stechtiefe: Bei der Stechtiefe muss zwischen a) der Sicht bezüglich der ruhenden Hautoberfläche und senkrecht dazu sowie b) bezüglich der Nadelanordnung und in deren Längsrichtung unterschieden werden. Betrachtet man wie in a) die Haut, interessiert vor allem, wie tief die Nadel in Bezug auf den Schichtenaufbau der Haut und damit in senkrechter Richtung zur Hautoberfläche eindringt. Verfolgt man andererseits wie in b) die Nadel, ist es wichtig zu wissen, welcher Bereich der Nadel in das Gewebe eingedrungen ist, beispielsweise, um die Geometrie der Nadelspitze entsprechend anpassen zu können. Man erkennt, dass bei einer Stechbewegung unter spitzem Winkel zur Hautoberfläche die jeweiligen Stechtiefen b) in Richtung des Stechkanals im Vergleich zur a) vertikalen Richtung zur Hautoberfläche unterschiedlich sind und je nach Winkel wesentlich voneinander abweichen. Vor allem bei Kanülen-Stechgeräten ist ein flacher Stechwinkel erforderlich, wenn eine eng tolerierte Applikationstiefe gefordert wird. Dabei muss der Winkel so gewählt und die Kanüle um ihre Längsachse so gedreht werden, dass das Kanülenauge horizontal zur entsprechenden Hautschicht liegt.

Insgesamt müssen bei der Kommunikation zwischen Entwickler und Anwender Begriffsdefinitionen hinterfragt und abgestimmt werden. Zusätzlich muss das eigentliche Entwicklungsziel aus der Forderung des Anwenders abgeleitet werden. Verwendet ein Tätowierer beispielsweise bisher zwei Maschinen mit unterschiedlichem Hub bei jeweils gleichem Nadelherausstand, mit denen er verschiedene Resultate erzielt, und wünscht sich daher eine Maschine mit integrierter Hubeinstellung, so steht für den Entwickler tatsächlich nicht die Hubeinstellung, sondern die einstellbare Nadelgeschwindigkeit im Fokus. Diese kann über eine integrierte Hubeinstellung realisiert werden, aber auch durch ein modifiziertes Antriebskonzept mit festem Hub. Ein weiteres Beispiel: im Bereich der kosmetischen Pigmentierung wird oft von Hub statt von Frequenz gesprochen („Ich arbeite mit Hub 85“). Denkbar ist, dass sich diese Begriffsverschiebung ergeben hat, weil die Angabe der Frequenz in der technischen Beschreibung zu den Stechgeräten meist als „Hubzahl pro Zeiteinheit“ erfolgt.

Nachfolgend sollen zwei Anwendungsgebiete für den intrakutanen Substanzeintrag beispielhaft vorgestellt werden.

Medizinische Behandlungen, insbesondere die Immunisierung durch intrakutanen DNS-Impfen

Das Immunsystem des Menschen verfügt über eine Art Langzeitspeicher, in welchem die Informationen, die bei einer durchlebten Infektion gewonnen wurden, abgelegt sind, sodass bei einer erneuten Infektion mit dem gleichen Erreger die Abwehrreaktion des Körpers durch das Immunsystem wesentlich schneller und effektiver erfolgt. Dieser Vorgang der Speicherung wird Immunisierung genannt. Einige Erreger sind jedoch derart pathogen, dass bereits die Erstinfektion vom Erkrankten gar nicht oder nur mit Glück überlebt wird, bzw. der Krankheitsverlauf eine hohe Belastung mit ungewünschten bleibenden Schäden beim Erkrankten darstellt.

Hier bietet sich das Impfen an, die so genannte aktive Immunisierung, wobei der zu Impfende mit einer im weitesten Sinne modifizierten Form des Erregers infiziert wird, sodass die Krankheit einen wesentlich milderen Verlauf nimmt. Die gespeicherten Informationen aus der künstlich herbeigeführten Erkrankung bieten dem immunisierten Körper jedoch die Möglichkeit, bei einer tatsächlichen Erstinfektion mit dem unveränderten Original-Erreger geringe oder keine Symptome der gefürchteten Krankheit auszubilden. Beispielsweise seien Erkrankungen wie Diphtherie, Wundstarrkrampf (Tetanus) oder Pocken genannt, die durch das Impfen erfolgreich bekämpft oder weitestgehend zurück gedrängt werden konnten.

Für die effektive Durchführung des Impfens soll das aufwendig hergestellte Vakzin in möglichst geringer Menge, an einer geeigneten Stelle und in die entsprechende Tiefe appliziert werden. Bei den meisten Impfverfahren wird dabei die äußere Barriere des Körpers, die Haut, mit einer Hohlnadel, einer so genannten Kanüle, durchdrungen.

Die klassische Impfung erfolgt als intramuskuläre Injektion, wobei dem Impferum meist Hilfsstoffe beigelegt werden, wodurch sich der Impferfolg schneller und stärker dadurch einstellen lässt, dass entsprechende Zellen chemotaktisch angelockt werden und über eine ihrerseits lokal verursachte Entzündungsreaktion den Abwehrmechanismus vervielfachen. Diese Hilfsstoffe werden allgemein kritisch gesehen, zumal hierbei teilweise Quecksilberverbindungen zum Einsatz kommen.

Bei besonderen Impfverfahren, z. B. auch beim aktuell erforschten DNS-Impfen, wird der Wirkstoff jedoch nicht im Muskel oder unter der Haut, sondern in der Haut platziert. Man spricht von einer intrakutanen Impfung.

Vom Robert-Koch-Institut, insbesondere von der „Ständigen Impfkommission“ STIKO, werden allgemeinhin Empfehlungen ausgesprochen, wie eine Impfung ausgeführt werden soll, z.B. in welche Schicht des menschlichen Körpers welche Mindestmenge des Vakzins zu applizieren ist [RoKo12]. Beim intrakutanen Impfen ist es von großem Interesse, die vorgegebene Schicht der Haut zu treffen, da nur geringste Mengen des DNS-Impfstoffs eingesetzt werden sollen, einerseits wegen der praktisch stark begrenzten Möglichkeit der Anlage eines Wirkstoffdepots, andererseits wegen der hohen Effektivität des Verfahrens bei richtiger Applikationstiefe. Den schematischen Aufbau der menschlichen Haut zeigt die Abbildung 2-2 (Corium synonym mit Dermis).

Für die intrakutane Impfung gegen Krankheiten, wie die Hepatitis C oder die HIV-Infektion, werden moderne Vakzine entwickelt und teilweise bereits klinisch erforscht, die Erbinformationen über die immunrelevanten Oberflächenstrukturen des Erregers mittels z.B. DNS-Molekülen transportieren.

Im Gegensatz zum klassischen Impfen besteht beim DNS-Impfen der aktive Teil des Impfstoffs nicht aus einem veränderten Erreger, sondern aus in oder mit Mikropartikeln verpackten speziellen DNS-Molekülen, welche Erbinformationen für die immunologisch relevanten Oberflächenstrukturen des Erregers enthalten. Die Mikropartikel werden von den dazu fähigen Zellen aufgenommen und die darin enthaltene DNS dem zelleigenen Erbgut vorübergehend hinzugefügt. Eine Dekodierung der Erbinformation veranlasst nun die Zelle ihrerseits, die dekodierten, im weiteren Sinne relevanten Oberflächenstrukturen in die eigene Zellmembran einzubauen und so den anderen dazu fähigen Zellen als „körperfremd“ zu präsentieren und darüber eine Immunantwort auszulösen. Der Vorteil hierbei ist, dass keine infektiösen Erreger für den Impfstoff benötigt werden und sehr kleine Mengen bereits ein viel versprechendes Resultat liefern. Zudem wird auch die Lagerung und Vervielfältigung des Impfstoffs deutlich vereinfacht.

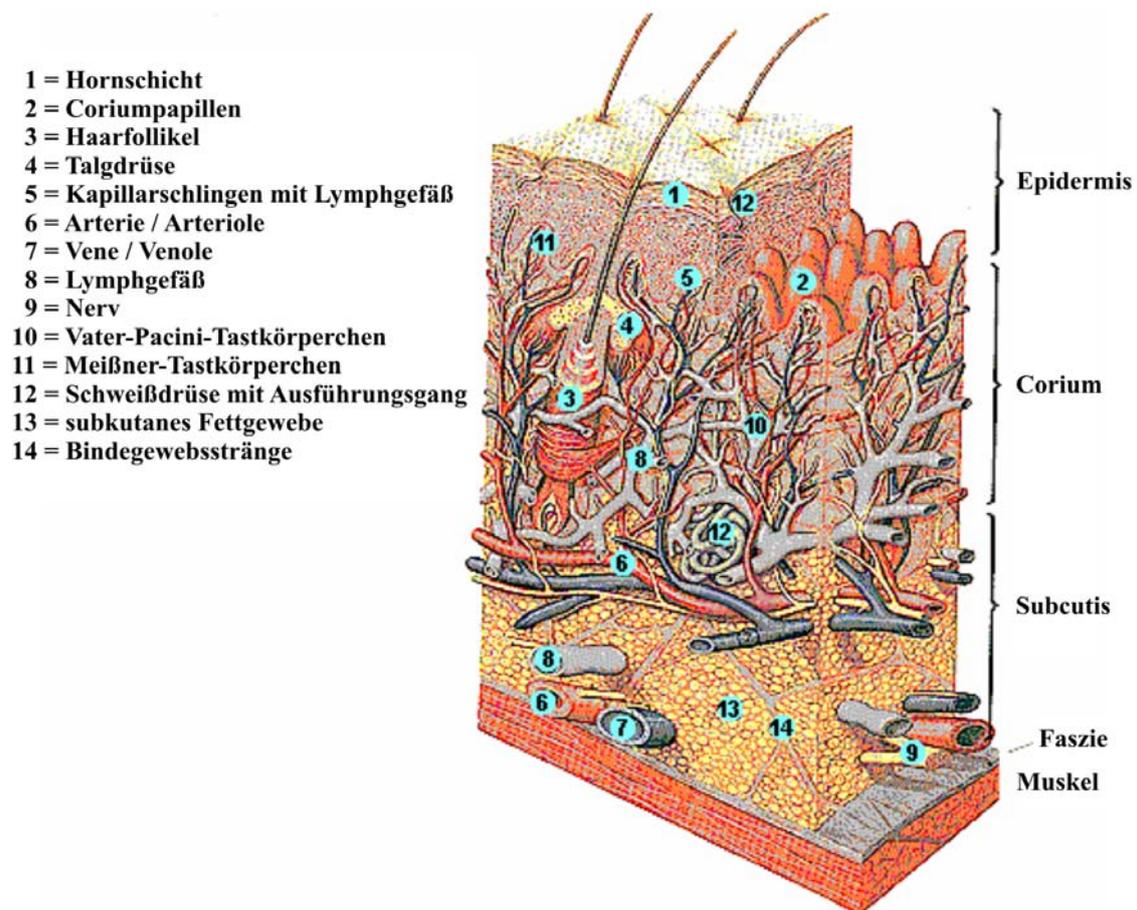


Abb. 2-2 Schematischer Aufbau der menschlichen Haut, modifiziert nach [MeIn12]

Im Fokus der bisherigen DNS-Impfforschung stand der Eintrag der Impfsuspension in die Epidermis, genauer in das Stratum spinosum (Stachelzellschicht) der Epidermis. Eine sche-

matische Darstellung des Schichtenaufbaus der Epidermis in der Abbildung 2-2 zeigt die Abbildung 2-3.

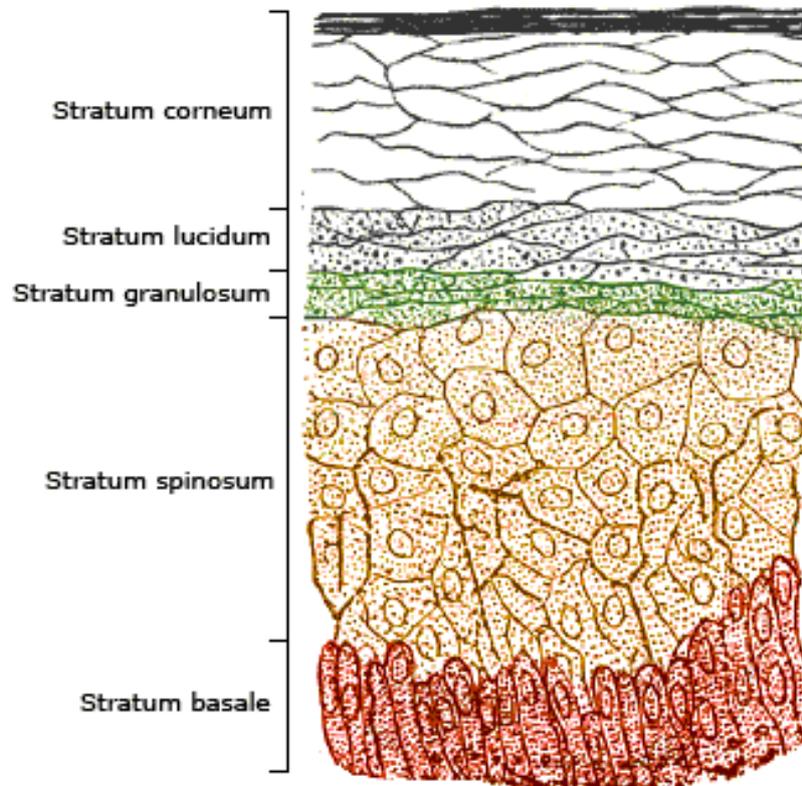


Abb. 2-3 Schichtenaufbau der Epidermis [WiEW11]

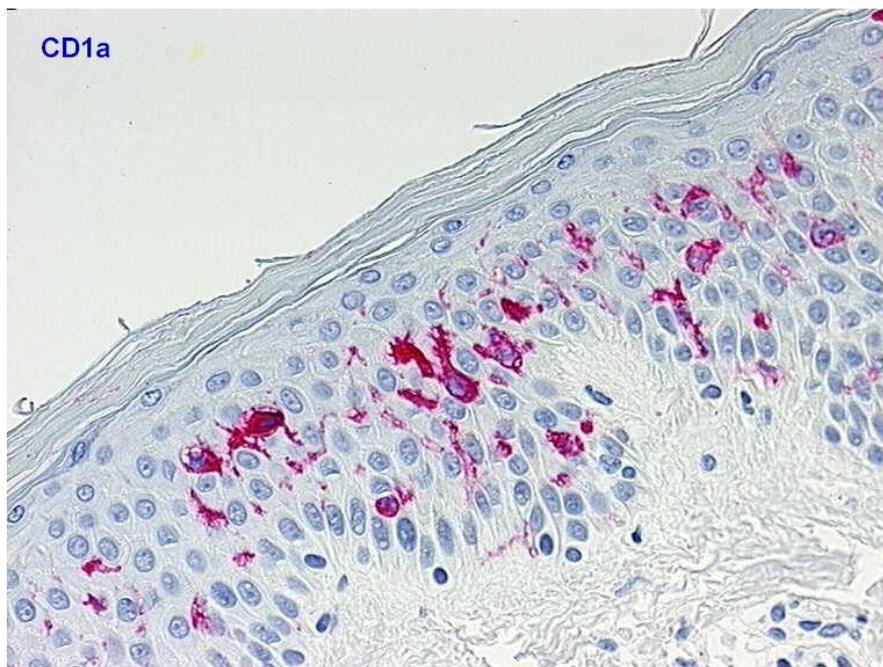


Abb. 2-4 Ein mit dem CD1a-Immunfluoreszenz-Marker und einem Standardverfahren gefärbtes mikroskopisches Präparat der Epidermis, wodurch die Langerhans-Zellen in großer Zahl im Stratum spinosum sichtbar gemacht wurden (rot gefärbte Zellkörper) [DeFr10]

In dieser Epidermisschicht findet man eine verhältnismäßig hohe Konzentration an Langerhans-Zellen, was in der Abbildung 2-4 mithilfe eines speziellen CD1a-Immunmarkers gut verdeutlicht wird. Die starke Präsenz der Langerhans-Zellen lässt sich damit begründen, dass es sich bei dieser Hautschicht von außen gesehen um den Übergangsbereich zwischen der leblosen Hornschicht und der stoffwechselaktiven und damit belebten Schicht des menschlichen Körpers handelt. Daher kann dieser Hautbereich als eine Art Grenzposten für die Detektion körperfremder, invasiver Strukturen verstanden werden.

Im Bereich der klinischen Forschung zeichnet sich nach einem Vortrag von Frau Dr. med. von Stebut-Borschitz [StBo11] ab, dass die in der Epidermis anzutreffenden dendritischen Zellen vor allem für die Entwicklung einer Immuntoleranz gegenüber den ausschließlich dort phagozytierten Strukturen verantwortlich sind, weit weniger für den gegenteiligen Effekt einer Immunität. Für die Erzeugung einer Immunität bei größerem Invasionsvermögen der körperfremden Strukturen scheinen danach vielmehr die in der Dermis anzutreffenden dendritischen Zellen verantwortlich zu sein. Die Applikation eines DNS-Impfstoffs in die Dermis ist demnach besonders vorteilhaft, da sich dort bereits bei der singulären Applikation ein hinreichend großes Volumen der Impflösung platzieren lässt. Anschließend verteilt sich der applizierte Bolus zunächst lokal im extrazellulären Raum, und der Wirkstoff wird über den unspezifischen Lymphstrom, beispielsweise in Richtung eines benachbarten Lymphknoten, abgeschwemmt, währenddessen einerseits eine hohe Zahl von dendritischen Zellen passiert und gleichzeitig eine lange Kontaktzeit dieser Zellen mit dem DNS-Impfstoff erhalten wird. Dabei beginnen die transfizierten Zellen, die im genetischen Code des Impfstoffs enthaltenen Informationen zu verarbeiten, die entsprechenden Oberflächenstrukturen zu produzieren und an ihrer Zelloberfläche zu präsentieren. Im Gebiet der Lymphknoten tritt eine große Anzahl immunkompetenter Zellen in Wechselwirkung mit der bereits prozessierten Information. Daher ist durch diese Art der Immunisierung bei minimalem Impfstoffeinsatz mit einer großen Effektivität zu rechnen. Offenbar werden Substanzen im weitesten Sinne vom Immunsystem erst als invasiv betrachtet, wenn sie die Epidermis als äußere Barriere zu durchdringen vermögen. Alle nicht invasiven Objekte oder Stoffe sind als ungefährliche Umgebungsgrößen einzustufen und werden vom Körper weitestgehend toleriert. Von daher kommt den epidermalen dendritischen Zellen im Zusammenspiel mit den dermalen eine entsprechende vermittelnde Rolle zu. Dies motiviert umso mehr eine eng tolerierte Stech- und Applikationstiefe. Damit wird deutlich, dass DNS-Impfstoffe mit entsprechendem Informationsgehalt schichtgenau appliziert werden müssen, um entweder eine gewünschte Hyposensibilisierung oder eine Immunisierung zu erzielen.

Für das erfolgreiche DNS-Impfen mit geringsten Impfstoffmengen ist es erforderlich, mit dem Impfmedium eine Vielzahl von Langerhans-Zellen zu benetzen. Dies gelingt aus aktueller Sicht beim intraepidermalen Impfen am effektivsten, wenn eine kleine Menge je Stechkanal bei einer hohen Stechkanalanzahl in der Epidermis abgegeben wird, ohne dabei die tieferen Hautschichten nennenswert einzubeziehen. Die Zielschicht liegt beim intraepidermalen Impfen etwa in einer Tiefe von 0,1 bis 0,3 mm.

Allerdings weicht die Haut einer eindringenden Nadel aus, sodass es bisher schwierig ist, die geforderte Hautschicht wiederholgenau zu treffen. Dies verdeutlicht sehr gut das in der Ab-

bildung 2-5 gezeigte Selbstexperiment, welches erkennen lässt, dass das Ausweichen der Haut nicht nur in unmittelbarer Nähe zur Einstechstelle Effekte zeigt. Die Abbildungen belegen die Verhältnisse bei flach gestochener Kanüle mit einem Außendurchmesser von 0,9 mm. Die oberen beiden Bilder zeigen die an einer auf der Unterarm-Innenseite frei Hand gezeichneten Linie angesetzte und langsam vorgeschobenen Kanüle, solange kein Eindringen in die Haut erfolgte. Beim Differenzbild unten in der Abbildung erkennt man gut das Ausmaß des Hautausweichens.

Hier ist nach aktuellem Kenntnisstand eine hohe Einstechgeschwindigkeit vorteilhaft, da bei hohen Geschwindigkeiten die Trägheit des massebehafteten Hautgewebes dem Eindellen entgegen wirkt. Weitere Möglichkeiten, das Ausweichen der Haut zu verringern, werden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und untersucht.

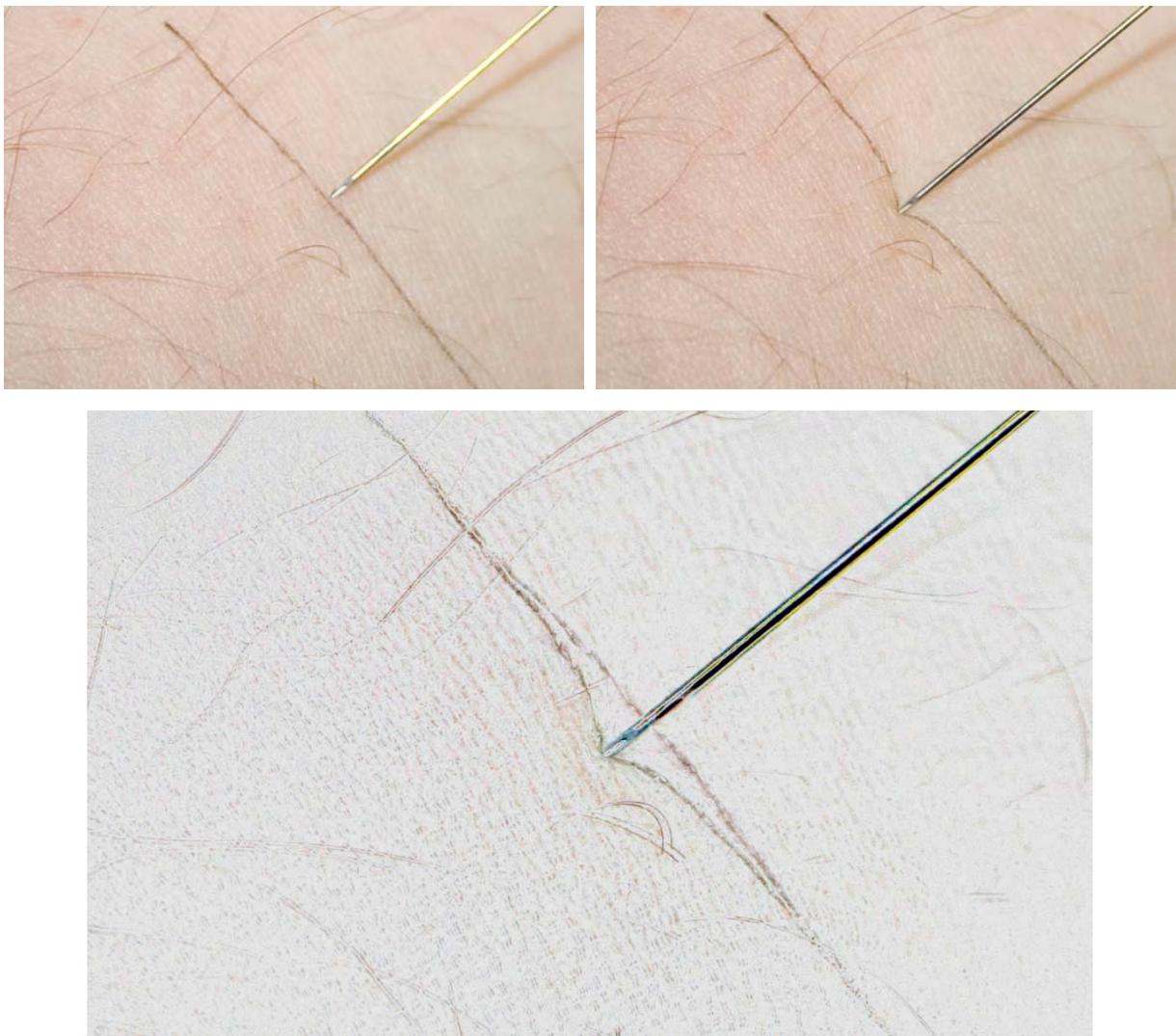


Abb. 2-5 Experiment zur Demonstration des Hautausweichens bei quasistatischem Stechen ohne Eindringen der Nadelspitze, unten die invertierte Differenz der oberen Aufnahmen

Für die Applikation des Impfstoffs stehen neben dem passiven Wirkstoffeintrag vermittelt adhäsiv benetzter Massivnadeln auch Kanülen oder Hohladeln zur Verfügung. Dabei muss beim Erreichen der gewünschten Hautschicht genügend Zeit zur Verfügung stehen, um den

Impfstoff möglichst gewebeschonend applizieren zu können. Eine zu hohe Austrittsgeschwindigkeit des Impfmediums würde eine Verletzung umliegenden Gewebes ähnlich dem Prinzip des Wasserstrahlschneidens sowie eine möglicherweise zerstörende Scherstressbelastung für die DNS-Molekül-Partikeldispersion bedeuten. Zudem muss die vordere Austrittsöffnung der Kanüle, das so genannte Kanülenaug, möglichst horizontal liegen, um die Flüssigkeit auf einer eng tolerierten Stechtiefe abgeben zu können.

Für das erfolgreiche intraepidermale Impfen muss trotz der Effektivität des Verfahrens eine solche Menge des suspendierten Impfstoffs in die Haut eingetragen werden, die das bei einem einzelnen Stechen platzierbare Volumen um ein Vielfaches übersteigt. Daher werden eine automatisierte Impfung und hierfür ein zyklisch arbeitendes Stechgerät gefordert, welches über genügend Stechkraft verfügt, um mehr als eine Nadel gleichzeitig in die Haut zu stechen, an die eine entsprechende Fluidikeinheit zur gezielten und dosierten Abgabe von Impfstoffmengen angekoppelt werden kann. So wird die Gesamtdauer der Impfung ökonomisch für den Anwender und gering belastend für den zu Impfenden gehalten. Mit der Entwicklung einer Fluidikeinheit befasst sich insbesondere die Arbeit von [Loth11].

Kosmetische Behandlungen, insbesondere Pigmentierungen der Haut

Auch bei kosmetischen Behandlungen der Haut wird in der Regel der Penetration der Hautoberfläche durch Nadelanordnungen der Vorzug gegeben. Nur wenige Verfahren setzen auf den Stoffeintrag durch andere Verfahren, beispielsweise durch eine mittels eines elektrischen Felds erzeugte Kraft auf frei bewegliche, geladene Moleküle, der so genannten Iontophorese (synonym verwendete Begriffe: Ionophorese, Ionotophorese u.ä.). Dabei liegen die Wirkstoffmoleküle in einer Trägerlösung mit definiertem und meist gepuffertem (stabilisierten) pH-Wert in ihrer dissoziierten (ionischen) Form gelöst vor. Ein äußeres elektrisches Feld bewirkt dabei eine Lorentzkraft auf die frei beweglichen Ladungsträger, sodass diese eine Wanderung im elektrischen Feld erfahren. Mit diesem Verfahren lassen sich jedoch nur sehr begrenzt bestimmte Eintragstiefen oder sichere Eintragsmengen erhalten.

In der Regel werden beim kosmetischen Stoffeintrag penetrierende Werkzeuge, typischerweise massive oder Hohladeln verwendet. Dabei sind die bekanntesten Verfahren das Tätowieren, das davon abgeleitete Permanent-Make-Up (PMU), die Mesotherapie*, die Faltenunterspritzung*, die Botox-Behandlung*, die Fetteinspritzung* oder die autologe Fettzellentransplantation* und viele weitere anbieterspezifische Verfahren (* = von einem Arzt auszuführen). Einige der genannten Verfahren basieren auf einer einmaligen Punktion der Haut mit meist manuellem Substanzeintrag via Hohladel bei flachem Stechwinkel zur Hautoberfläche und langem Stechkanal, z. B. über eine Spritze mit Kanüle. So lassen sich linienartige Applikationen auf gleicher Stechtiefe erzielen, wie sie für das Faltenunterspritzen benötigt werden. Dabei steht die vertikale Eintragtiefe bezüglich des Hautschichtenmodells weniger im Vordergrund, sodass hierbei geringer Bedarf an einer eng tolerierten Applikationstiefe besteht.

Dagegen ist vor allem bei den Pigment eintragenden Verfahren, wie dem Tätowieren oder dem PMU, die Applikationstiefe für die Pigmentsuspension neben anderen Parametern entscheidend für den Behandlungserfolg und die mit der Behandlung verbundenen Missempfin-

dungen. Eine zu geringe Eindringtiefe führt zu einer schlechten Pigmentierung, bzw. zum frühzeitigen Verblässen dieser, weil die obersten Hautschichten einerseits wenig extrazelluläres Speichervolumen und andererseits eine ständige basale Zellregeneration mit nach außen gerichteter Partikelwanderung aufweisen.

Für eine dauerhafte Pigmentierung muss daher die Basalzellschicht der Epidermis durchdrungen und die Pigmente möglichst direkt unterhalb der Epidermis platziert werden. In diesem Bereich werden die Pigmente in der Frühphase der Hautreaktion als Partikel deutlich geringer von der Strömung der Extrazellulärflüssigkeit, der so genannten Lymphe, erfasst. Zudem können sie in dieser geringen Tiefe mit von außen auf die Haut fallendem Licht bestmöglich interagieren und so ihre subjektiv wahrgenommene Farbigkeit bewirken. Je tiefer die Pigmente platziert werden, desto höher ist der zuvor an den oberhalb liegenden Strukturen reflektierte Anteil des Lichts, was zu einer deutlich blässeren Farbwahrnehmung beim äußeren Betrachter führt. Dies ermöglicht auch den sparsamen Eintrag der Pigmente, deren Körperunbedenklichkeit teils unbekannt ist oder kritisch gesehen wird. Werden die farbigen Zubereitungen zu tief eingetragen, wandern die direkt nach dem Eintragen noch lokalisiert vorliegenden, partikulär anzusehenden Pigmente in dieser Hauttiefe stärker, was zu einem Verlaufen der anfänglich klar begrenzten Bildkonturen führt. Zudem werden beim tiefen Stechen in Haut mehr und größere Blutgefäße verletzt, oder es tritt durch den geweiteten Stechkanal Lymphflüssigkeit nach außen. Beides wird als nachteilig angesehen, da einerseits bereits eingetragene Pigmente wieder aus der Haut gespült werden, andererseits die Sicht vermindert, die Infektionsgefahr erhöht und letztlich die Haut unnötig stark gereizt wird, sodass diese lokal anschwillt und damit verhindert wird, dass an dieser Stelle weitere Pigmente in die Haut eingetragen werden können. Darüber hinaus mischt sich austretender Blutfarbstoff mit der Pigmentzubereitung, was den Tätowierkünstler bei seiner Arbeit behindert und dem Modell den Ersteindruck des Ergebnisses verleidet. Im Anschluss an die Behandlung tritt in diesen Bereichen eine vermehrte Hautreaktion auf, welche ihrerseits die Stabilität der Pigmentierung gefährdet.

Das Tätowieren unterscheidet sich vom PMU sowohl in der Wahl der technischen Mittel, als auch in der Klientel und bei der kommerziellen Verwertung. Die verwendeten Maschinen sind im Tätowiersektor deutlich vielfältiger bezüglich der äußeren Gestaltung und der verwendeten Antriebstechnologie. Zudem existiert hier eine Art Subkultur und „verruhtes“ Image, während beim PMU die seriöse Behandlung mit technisch hoch ausgereiften Steuergeräten und mit im Design ansprechend gestalteten, leisen Maschinen im Vordergrund steht. PMU wird vor allem im Gesichtsbereich aufgelegt, sodass die PMU-Maschinen wegen der insgesamt zarteren und damit leichter zu penetrierenden Haut eine geringere maximale Stechgeschwindigkeit und einen geringeren Nadelhub als Tätowiergeräte aufweisen.

2.2 Mathematische Grundlagen

Da in dieser Arbeit mehrere Konzepte mechanisch bewegter Teile mit bestimmten Lagebeziehungen zueinander untersucht werden, wird ein Verfahren benötigt, um die Lage der bewegten Teile für eine Analyse oder Synthese anschaulich mathematisch beschreiben zu kön-

nen. Meist lassen sich die Teile auf eine einfache Längsstruktur bekannter Abmaße sowie auf eine gemeinsame Bewegungsebene reduzieren. Seltener sind die Antriebskonzepte echt dreidimensional. Wegen der Begrenzung auf zwei, maximal drei Dimensionen bietet sich die übersichtliche Vektorrechnung als mathematisches Werkzeug an. Dabei wird jedes Bauteil einer Antriebskette auf einen Vektor reduziert, dessen Richtung und Länge die wesentlichen geometrischen Abmessungen widerspiegelt und die Interaktionspunkte mit den benachbarten Teilen verbindet, z. B. die Augen eine Pleuels.

Vor allem werden als Werkzeuge der Vektorrechnung die Vektoraddition, die so genannte (Vektor-) Drehmatrix und der Betrag eines Vektors, also seine euklidische Norm oder Länge, herangezogen und nachfolgend für den 2D-Fall kurz rekapituliert. Daneben wird der Satz des Pythagoras als bekannt vorausgesetzt.

Ein ebener Vektor $\underline{a} = (a_x \mid a_y)$ mit seinen Komponenten a_x und a_y kennzeichnet die Lage eines Punkts im gewählten Koordinatensystem, welches durch seinen Ursprung $(0 \mid 0)$ und die senkrecht aufeinander stehenden (kartesischen) Basisvektoren $\underline{x} = (1 \mid 0)$ und $\underline{y} = (0 \mid 1)$ definiert wird.

Bei der Addition zweier Vektoren werden die jeweiligen Komponenten addiert, die Subtraktion erfolgt analog. Beide können verwendet werden, um einen neuen Vektor zu erzeugen, man vergleiche hierzu die Abbildung 2-6. Bei der Subtraktion entsteht z. B. ein Vektor, der vom Subtrahenden zum Minuenden zeigt (gestrichelt-blauer Vektor) und mit seinem Startpunkt in den Ursprung parallel verschoben wird (durchgezogen-blauer Vektor).

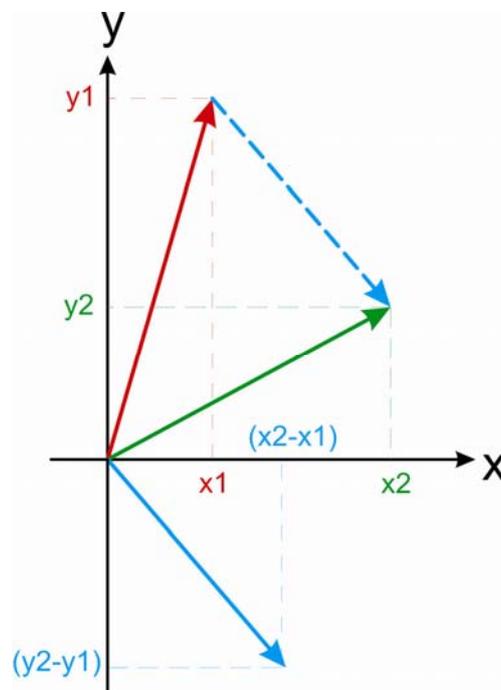


Abb. 2-6 Darstellung eines Vektors (blau) als Differenz zweier bekannter Vektoren (grün minus rot)

Entspricht die Richtung des so erzeugten Vektors der durch die beiden ersten Bauteile definierten Längsachse des dritten Bauteils, nicht jedoch seine Länge, teilt man den Vektor durch dessen Betrag und erhält so einen auf die Länge Eins normierten Richtungsvektor, der mit der

Bauteillänge skalar multipliziert nun das dritte Bauteil in Richtung, Richtungssinn und Länge repräsentiert.

Häufig handelt es sich um Antriebskonzepte auf der Basis von Elektromotoren mit einer rotierenden Welle als Ausgangselement, auf der beispielsweise eine Kurbel angebracht wird. Die Kurbel stellt dabei einen mit festem Abstand um die Mittelachse der Motorwelle rotierenden Punkt dar, der sich als ein zeitabhängig rotierender Vektor darstellen lässt. Soll z. B. - wie in der Abbildung 2-7 grafisch veranschaulicht - ein Vektor $\underline{e}(t)$ mit der Länge e um den Ursprung und einen Winkel $\varphi(t)$ in der x-y-Ebene gedreht werden, verwendet man die so genannte 2D-Drehmatrix. Diese wirkt auf den Vektor von links ein, d.h. der Vektor steht bei der Multiplikation rechts von der Matrix.

Besitzt der Winkel $\varphi(t)$ eine lineare Zeitabhängigkeit, so sind die Drehzahl f , die Umlauf- oder Periodendauer T und die Winkelgeschwindigkeit ω des gedrehten Vektors $\underline{e}(t)$ konstant und können mit dem Index 0 bezeichnet werden.

$$\varphi(t) = 2\pi \cdot f \cdot t = \frac{2\pi}{T} \cdot t = \omega_0 \cdot t \quad \text{mit } \omega_0 = \text{const.} \quad (2-1)$$

$$\bar{\underline{e}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) & -\sin(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) & \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix}}_{\text{2D-Drehmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Vektor } \underline{e}_0} = e \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

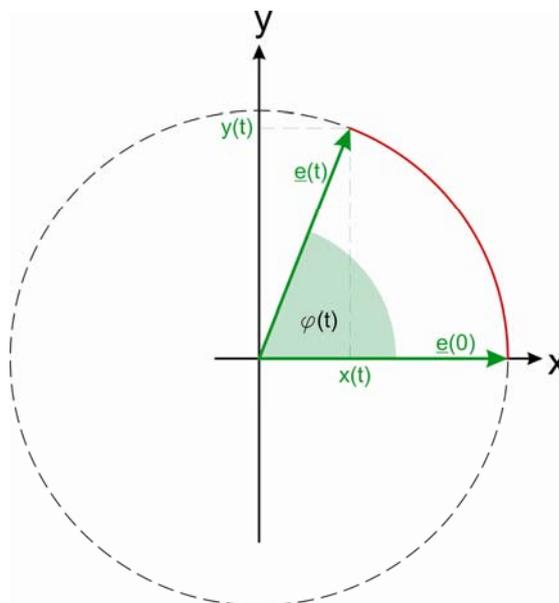


Abb. 2-7 Drehung eines Vektors \underline{e} um einen zeitveränderlichen Winkel $\varphi(t)$

In der Abbildung 2-7 erkennt man den Ausgangsvektor $\underline{e}(0) = (e \mid 0)$ als skalares Vielfaches des x-Basisvektors zum Zeitpunkt $t = 0$, und mit einem roten Bogen dargestellt den nach der Zeit $t = T \cdot \varphi / 2\pi$ überstrichenen Weg der gedrehten Kurbel.

2.3 Stand der Technik

Allgemein stehen für das Eintragen von Substanzen in die Haut verschiedene Techniken zur Verfügung, unter anderem die Punktion der Haut. Die Wahl des Verfahrens hängt im Wesentlichen von der Art der Applikation und der gewünschten Applikationsstiefe ab. Dabei ist bei medizinischen und kosmetischen Indikationen der Erfolg der Behandlung in besonderem Maße von der Einhaltung der richtigen Applikationstiefe abhängig.

In der Medizin verwendet man für den Substanzeintrag in Haut die Begriffe intrakutan (lateinisch. cutis = Haut, intra = hinein) und intradermal (griechisch. derma = Haut) meist synonym. Abweichend davon werden dagegen z.B. bei [MaBe07] zur Beschreibung von hautchirurgischen Nahttechniken zum Zusammenfügen zweier Wundränder beide Begriffe deutlich unterschieden. Der Wortteil „intradermal~“ bezeichnet dabei eine größere Hautschichttiefe für die Naht, „intrakutan~“ dagegen sehr oberflächliche Hautschichten, wie die Epidermis und die sich unmittelbar daran anschließenden Bereiche der Dermis. In dieser Arbeit werden beide Begriffe gemäß der ersten Auffassung synonym verstanden. Es wird vorrangig der Begriff intrakutan verwendet.

So wird bei einer medizinischen Anwendung für eine intra- oder subkutane Injektion eines klassischen Wirk- oder Impfstoffs typischerweise eine Spritze mit Kanüle verwendet, wobei meist eine einzelne Applikation vorgenommen wird, siehe Abbildung 2-8.



Abb. 2-8 Intrakutane Applikation des Agens bei einem Tuberkulin-Test [Wiik12]

Die Haut wird nur noch bei wenigen klassischen Impfungen als Applikationsort gewählt, steht aber bei der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der DNS-basierten Impfung erneut im Fokus. Bei einem herkömmlichen Impfverfahren wird die Impfstoffflüssigkeit während des Ritzens der Haut mit einer so genannten Bifurkationsnadel appliziert. Dies wendet man vor allem beim intrakutanen Impfen gegen Pocken an. Dabei wird mit der Aussparung in der lanzettartigen Nadelspitze ein Tropfen des Impfstoffs mittels adhäsiver Benetzung aufgenommen und

während des Hautritzens in die entstehende Hautläsion eingetragen, vergleiche die Abbildungen 2-9 und 2-10. Gut zu erkennen ist das dabei auftretende Hautausweichen, welches die Einhaltung oder Vorausbestimmung einer gewünschten Applikationstiefe nahezu unmöglich macht.



Abb. 2-9 Impfset für die Impfung gegen Smallpox [WiSP12]

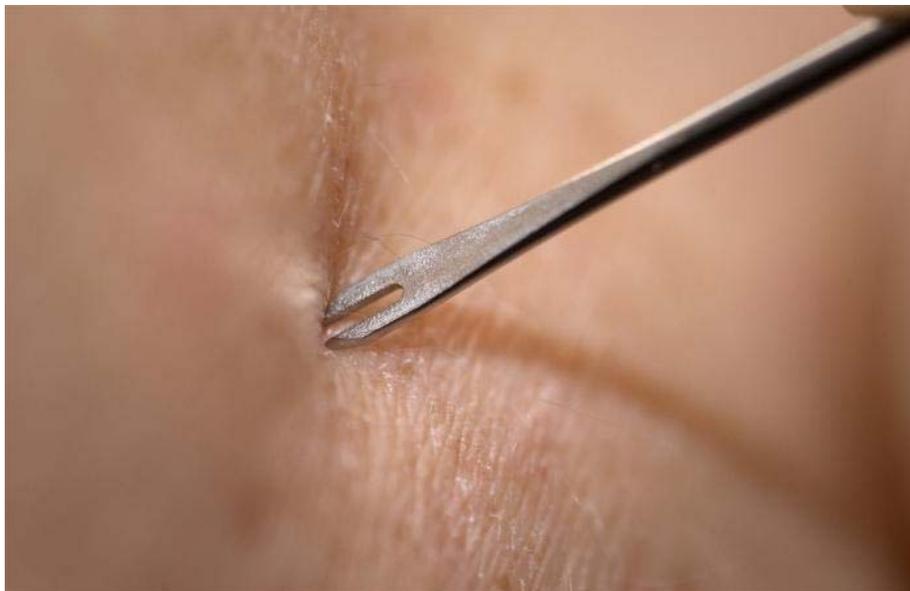


Abb. 2-10 Beispielhafte Anwendung einer Bifurkationsnadel beim Ritzen der Haut [WiSV12]

Im Bereich der aktuellen Forschung, insbesondere beim DNS-Impfen, verwendet man für das großflächige intrakutane Eintragen des Impfstoffs zweckentfremdete Permanent-Make-Up- (PMU) bzw. Tätowiergeräte, da sie im Vorhinein dafür bestimmt sind, einen flüssigen Stoff in kleinster Menge je Stechvorgang in die Haut zu transportieren. Dazu wird beispielsweise bei ex-vivo-Experimenten eine definierte Flüssigkeitsmenge bekannter Konzentration an Erbinformationsmolekülen, welche für ein gewünschtes Protein codieren, auf die Haut aufgetragen.

Anschließend wird der Wirkstoff für eine begrenzte Zeit und auf einer durch eine Arbeitsmaske mechanisch begrenzten Fläche in die Haut eingearbeitet. Abschließend wird die Haut mit einer Nährflüssigkeit überschichtet, um die Stoffwechselfvorgänge der Hautzellen bis zum Nachweis der erfolgreichen Expression der Erbinformation aufrechterhalten zu können.

In der Abbildung 2-11 ist ein in der DNS-Impfforschung am Nationalen Krebsinstitut (NKI) Antoni van Leeuwenhoek in Amsterdam, Niederlande, verwendetes Permanent-Make-Up-Gerät im Einsatz zu sehen. Da die eingesetzten Pigmentiergeräte jedoch über keine Vorrichtung zum quantitativen Einstellen der Einstechtiefe oder der eingetragenen Flüssigkeitsmenge verfügen, lassen sich die Forschungsergebnisse nur bedingt miteinander vergleichen und auf weitere Studien übertragen. Dies motiviert eine Vorrichtung für eine einstellbare Stechtiefe. Zudem konnte [Loth11] in seiner Arbeit zeigen, dass ein deutlicher Anteil der Flüssigkeit zur Benetzung des Moduls dient und daher nicht für das Eintragen in die Haut zur Verfügung steht.

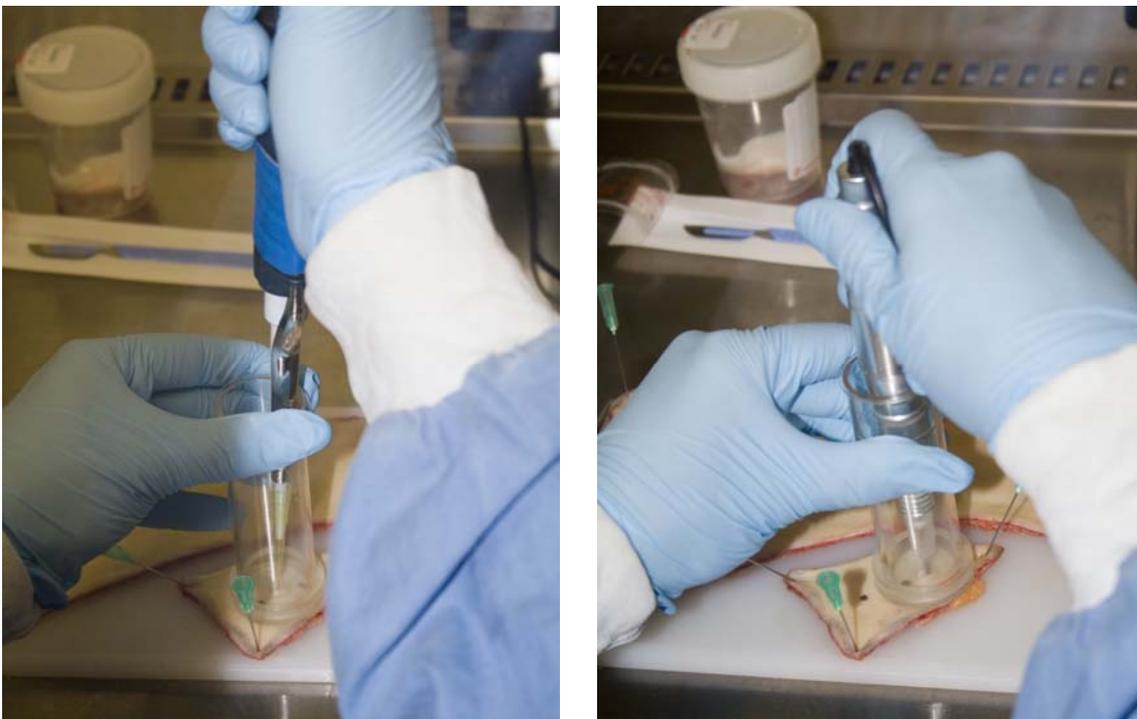


Abb. 2-11 Experimentelles Testimpfen an explantierter Haut, links: Aufbringen einer definierten DNS-Menge, rechts: Arbeiten mit einem PMU-Gerät

Im kosmetischen Bereich verwendet man maschinell betätigte Stechgeräte vorrangig, um beim Tätowieren und beim Auflegen von Permanent-Make-Up die so genannte Farbe, eine dick- bis zähflüssige Zubereitung auf der Basis einer viskosen Grundflüssigkeit mit einem hohen Anteil dispers verteilter Pigmente, also für das menschliche Auge farbige Partikel, in die Haut einzubringen. Dafür werden wiederholt und in schneller Folge Stechbewegungen vom Gerät ausgeführt, wobei eine Nadelanordnung meist aktiv vorgeschoben und durch elastische Konstruktionselemente passiv zurückgezogen wird. Eine solche Bewegung kann sowohl von Hand, wie bei der klassischen hawaiianischen Tätowierung, aber auch von

einer Maschine, einem Stechaktor zur Wandlung einer Eingangsenergieform in mechanische Lage- und Bewegungsenergie, erzeugt werden.

Es gibt am Markt verschiedene Konzepte, diese Energiewandlung vorzunehmen, um damit die Stechbewegung zu erzeugen. Meist werden elektrische Antriebe verwendet, es existieren jedoch auch federbasierte Aufziehmotoren. Für die elektrisch betriebenen Geräte werden üblicherweise Zuganker-, Taumelscheiben- oder Kurbelantriebe verwendet, die wegen ihrer weiten Verbreitung und der Bedeutung von Tätowiergeräten in den kosmetischen und medizinischen Anwendungen nachfolgend näher beschrieben werden.

Reluktanzkraft-Zuganker-Aktor

Dieser Antrieb wurde bereits früh für das gerätegestützte Tätowieren in die Haut eingesetzt. Meist wird zur Erzeugung der Stechbewegung das einfache Prinzip eines Wagner-Hammers genutzt, um mit einer Gleichstromquelle eine oszillierende mechanische Bewegung zu erhalten. Es sind jedoch besonders im Bereich der Subkultur in Haftanstalten Reluktanzkraft-Maschinen auf der Basis von umgebauten elektrischen Rasierapparaten bekannt, die mit Wechselstrom betrieben werden und daher keinen Unterbrecherkontakt benötigen. Auch modifizierte Lautsprecher sind bekannt, die auf der Lorentzkraft basieren und mit Wechselstrom betrieben werden.

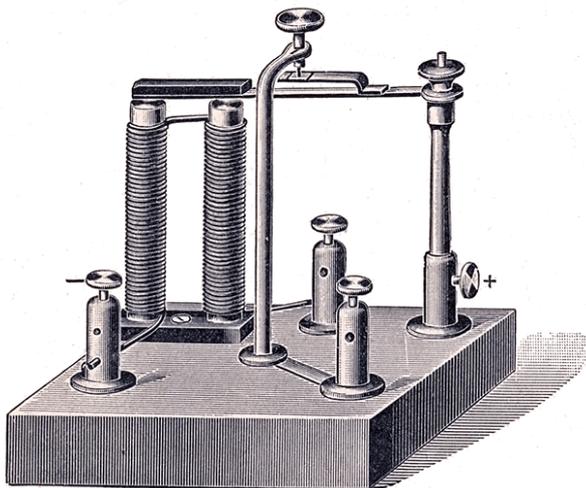


Abb. 2-12 Wagner-Hammer, links Zeichnung [WiWH10], rechts innerer Aufbau einer antiken Klingel

Der Wagner-Hammer wurde 1836 erfunden. Das Arbeitsprinzip beruht auf der Tatsache, dass der Betriebsstrom für einen Elektromagneten über einen elektromagnetisch betätigten elektrischen Unterbrecherkontakt geführt wird, sodass beim Anziehen des Ankers der Kontakt geöffnet und damit der Stromfluss durch den Elektromagneten unterbrochen wird. Somit bricht das Magnetfeld in dessen Spule zusammen, der Zuganker fällt ab, schließt den elektrischen Kontakt wieder, und der Vorgang beginnt erneut.

Um die elektromagnetische Verträglichkeit, kurz EMV, zu erhöhen, wird bei modernen Gleichstrom-Spulenmaschinen auf der Basis des Wagner-Hammers ein Elektrolytkondensator dem Unterbrecherkontakt parallel geschaltet, um den Ablösefunken zu minimieren und um

die schlagartig frei werdende Energie, welche in den magnetfelddurchfluteten Spulen gespeichert ist, abzapfen.

Durch gezieltes Stellen an der Kontaktschraube ist es möglich, bei unveränderter Betriebsspannung die Kontaktdauer und damit die Parameter der Ankerdynamik zu ändern. Zudem werden durch die Gestaltung der Maschine und das Anbringen zusätzlicher elastischer Komponenten, z. B. eines Gummielements unter der Kontaktfeder, das Verhalten des Geräts geändert, wobei von einer „harten“ oder einer „weichen“ Einstellung gesprochen wird. Darunter soll in dieser Arbeit eine Veränderung der Kontaktzeit durch Einstellung der Kontaktschraube des Unterbrechers verstanden werden.

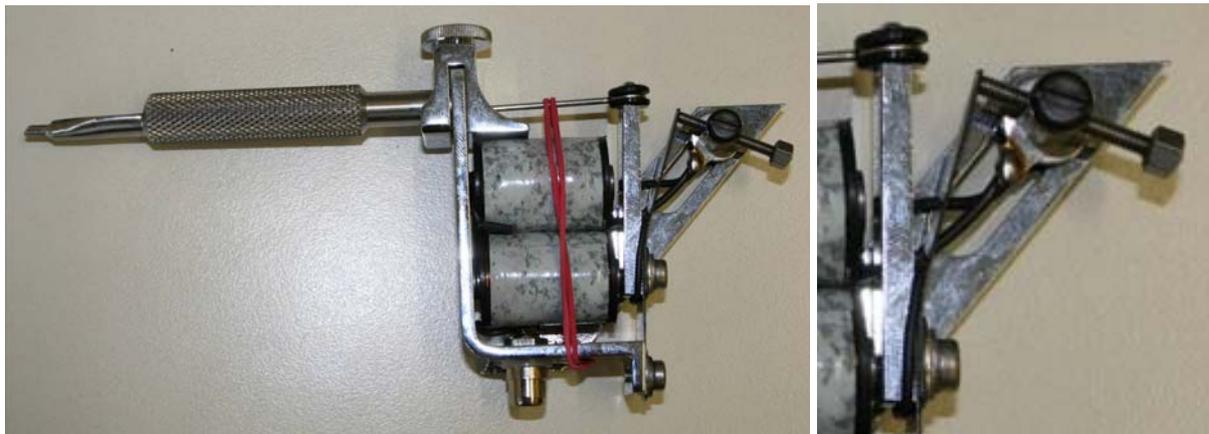


Abb. 2-13 Eine Zuganker-Tätowiermaschine, links in der Übersicht, rechts eine Detailaufnahme des Gleichstromunterbrechers mit schräg verlaufender Kontaktschraube

An der in der Abbildung 2-13 dargestellten Tätowiermaschine wurde mittels eines Laser-Triangulationssensors mit hoher zeitlicher Auflösung bei einer Betriebsspannung von 12 V der Hub der Stechnadel über der Zeit gemessen. Anschließend wurden die Messwerte in Excel® importiert. Mittels diskreter Ableitung wurde in guter Näherung die Geschwindigkeit ermittelt. Die Messwerte und die daraus abgeleitete Werte zeigen die Abbildungen 2-14, 2-15 und 2-18.

In der Abbildung 2-14 wurden ausgewählte Datenpunkte beschriftet und über das Auszählen der Perioden und der Bestimmung der Zeitdifferenz eine Stechfrequenz errechnet. Die „weiche Einstellung“ bedingt demnach eine Stechfrequenz von 86,674 Hz ($\Delta t = 0,0923$ s über acht Perioden), die „harte Einstellung“ eine Stechfrequenz von 104,773 Hz ($\Delta t = 0,0923$ s über neun Perioden). Letztere wurde für die vergleichende Betrachtung der anderen Antriebe und die damit verbundenen Modellrechnungen als Soll-Stechfrequenz zugrunde gelegt.

In der Abbildung 2-14 ist ein Ausschnitt der aufgenommenen Messdaten dargestellt. Auf dem gleichen Zeitbereich wurden die Geschwindigkeiten beider Kurven als diskrete Zeitableitungen gebildet und als Funktion über dem Weg der Nadel, bzw. dem Nadelhub in der Abbildung 2-15 dargestellt. Es werden etwa acht bis zehn einander überlagerte Perioden der Stechbewegung gezeigt, wobei negative Geschwindigkeiten der Einstechbewegung zuzuordnen sind, positive der Rückholbewegung. Der Umlaufsinn ist der Uhrzeigersinn, wobei die größte

Stechtiefe als Bezugslage gewählt wurde. Man erkennt ein systematisches Rauschen, abhängig vom Nadelhub und der Bewegungsrichtung.

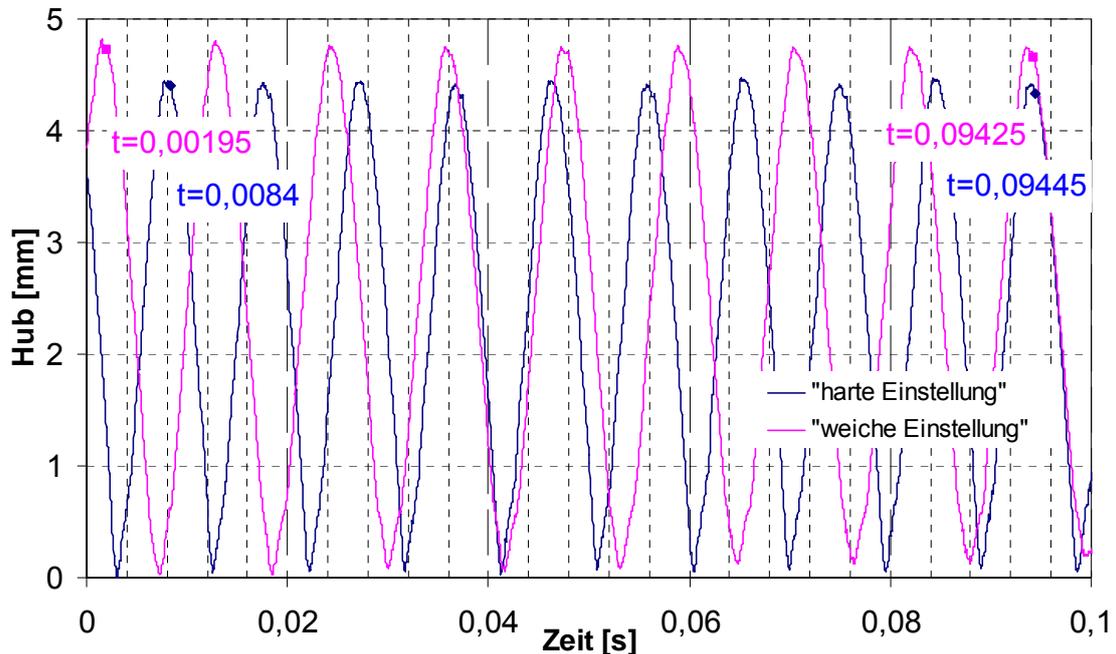


Abb. 2-14 Weg-Zeit-Funktionen bei unterschiedlicher mechanischer Vorspannung des Unterbrecherkontakts der Tätowiermaschine aus der Abbildung 2-13 bei $U = 12 \text{ V}$

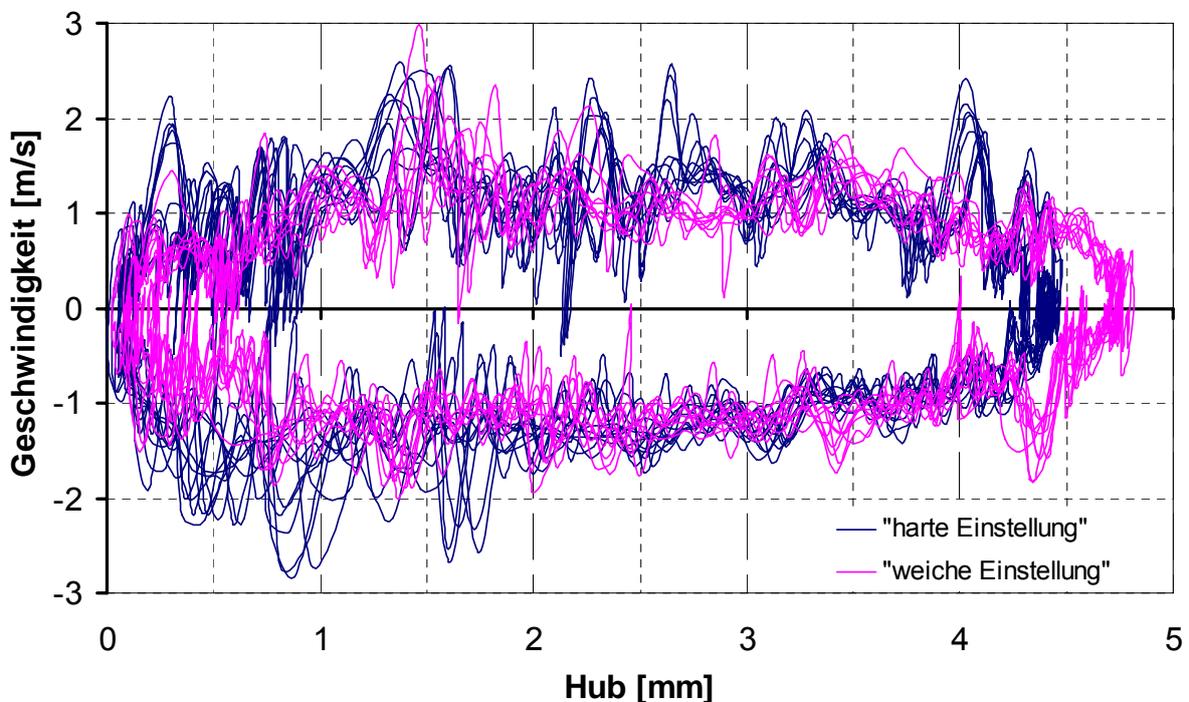


Abb. 2-15 Geschwindigkeits-Weg-Funktionen zu den Messdaten in der Abbildung 2-14

Um die stark verrauschten Daten aus der Abbildung 2-15 zu glätten, wurde in Excel® eine diskrete Filtermaske realisiert, die 29 Wichtungsfaktoren mit einem auf Eins normierten Betrag in Form einer Glockenkurve enthält. Die Intervallbreite von 29 Messwerten entspricht

bei der vom Triangulationssensor verwendeten Messfrequenz von 20 kHz einer Glättungsdauer von 1,45 ms. Das Prinzip der gleitenden Glättung zeigt die Abbildung 2-16 und kann auch als „gewichtete Summation“ bezeichnet werden. In den Kästen der Filtermaske sind die ausgeführten Rechenoperationen mit dem zugehörigen Symbol dargestellt. Demnach wird eine bestimmte Anzahl an Werten vor und nach dem aktuell betrachteten Zeitpunkt mit einem Wichtungsfaktor skaliert, anschließend alle Werte addiert und als gefilterter Wert für den aktuell betrachteten Zeitpunkt abgelegt. Das Ergebnis der Glättung ist in der Abbildung 2-18 dargestellt.

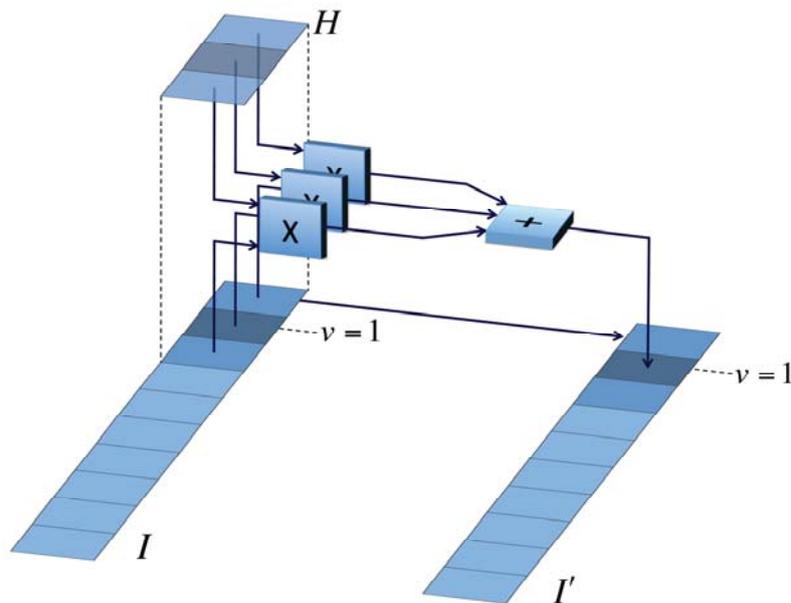


Abb. 2-16 Prinzipielle Wirkung eines linearen Filters mit gewichteter Summation. Die Filterwirkung ist abhängig von den in der Filtermaske H hinterlegten Werten [Land10]

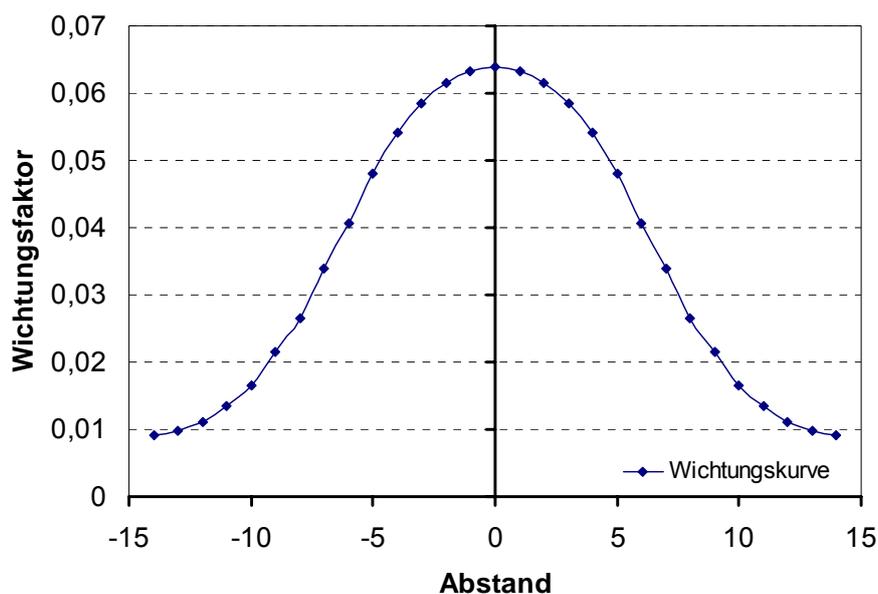


Abb. 2-17 Darstellung der für die Glockenkurven-Filtermaske H und in der Gesamtsumme auf Eins normierten diskreten Wichtungsfaktoren ($n = 29$)

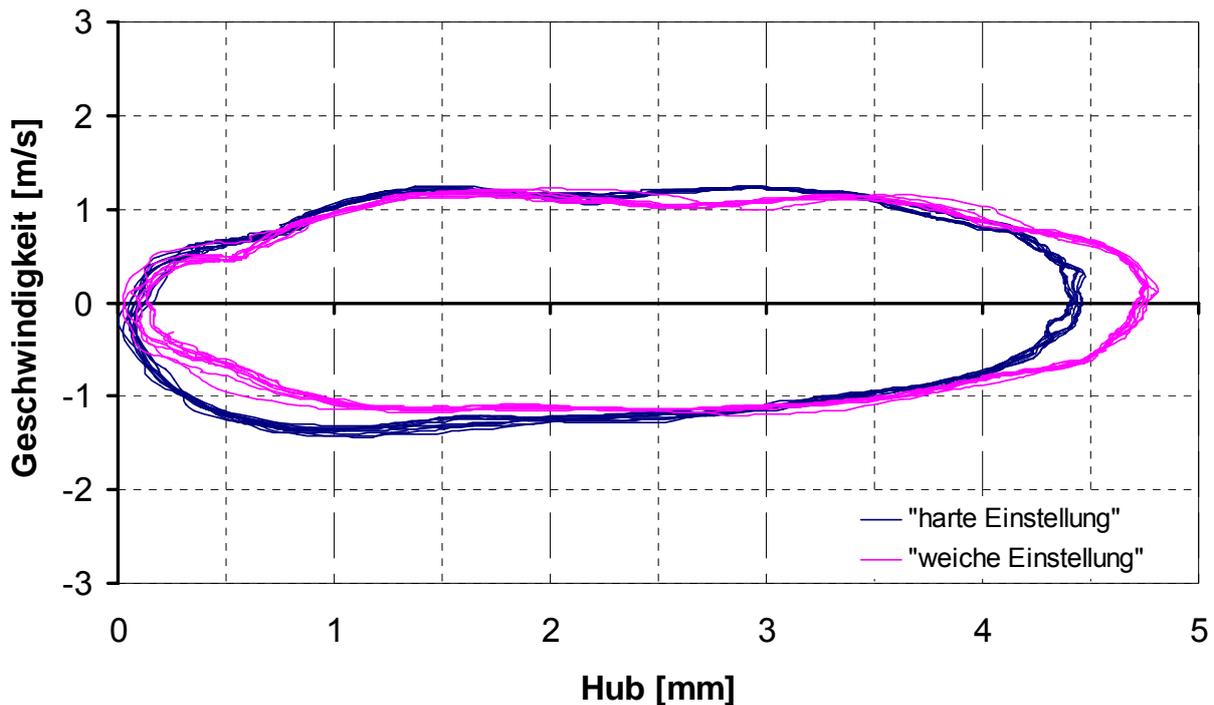


Abb. 2-18 Geschwindigkeits-Weg-Funktionen zu den Messdaten in Abbildung 2-14 nach Glättung durch den Glockenkurven-Filter aus Abbildung 2-17

Man erkennt eine relativ konstante Stechgeschwindigkeit über einem großen Teil der Stechbewegung, sodass sich diese bei einer Stechtiefe größer als 1 mm wenig ändert. Die maximal mögliche Stechgeschwindigkeit liegt bei etwa 1,4 m / s und ist nur geringfügig von der Stechfrequenz abhängig.

Kurbeltrieb-Aktor

Der Kurbeltrieb stellt einen zweiten Standard-Linearantrieb bei Stechaktoren, insbesondere im Tätowierbereich dar, siehe Abbildung 2-19. Um diese Maschinen von den Spulen- oder Coil-Maschinen abzugrenzen, werden sie als Rotary-Maschinen bezeichnet.



Abb. 2-19 Kurbeltrieb eines zerlegten Tätowiergeräts Cheyenne™ Condor der Firma MT.DERM, links in der Gesamtansicht, rechts der Kurbeltrieb im Detail

Prinzipiell besteht dabei die Möglichkeit, die Längsachse des Abtriebs parallel versetzt zur Motorwellenebene anzubringen, um eine Veränderung der Geschwindigkeits-Weg-Beziehung sowie eine Veränderung des Totpunktabstands und damit die Möglichkeit zur Hub- bzw.

Stechtiefeinstellung zu erhalten. Technisch wird dieser Parallelversatz als Schränkung bezeichnet. Die Abbildung 2-20 zeigt die schematischen Verhältnisse eines geschränkten Kurbeltriebs. Dabei ist die Langssachse der Kolbenbewegung um eine Strecke q parallel zur z -Achse versetzt angeordnet. Die der Kolbenlangssachse nahe Kurbelbewegung, durch ein negatives Vorzeichen für die Werte von $a(t)$ gekennzeichnet, bedingt höhere Geschwindigkeiten des Kolbens als die ferne, vergleiche hierzu die Abbildung 2-21.

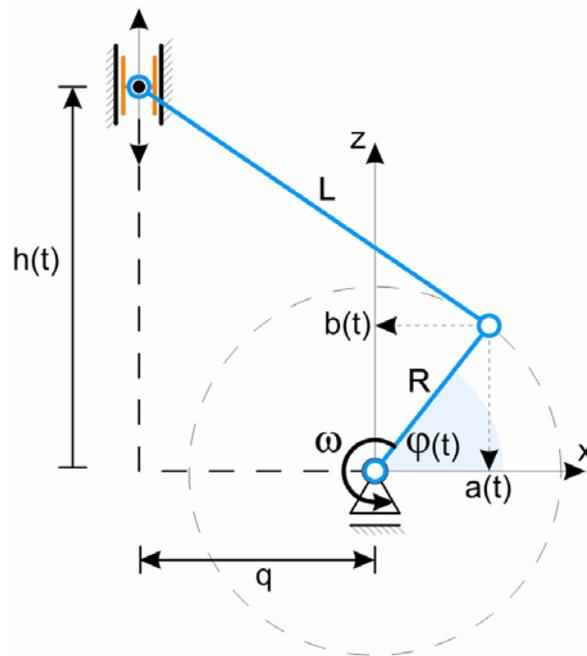


Abb. 2-20 Schematische Grundlagen eines um den Betrag q geschränkten Kurbeltriebs

Die Möglichkeit einer integrierten Stechtiefeinstellung mittels einer variabel gestalteten Schränkung wurde analytisch untersucht.

Den formalen Zusammenhang beschreiben die Gleichungen (2-3) und (2-4). Hier wurde unter Verwendung des Satzes von Pythagoras die Kolbenweg-Zeit- sowie durch einfache Zeitableitung die Kolbengeschwindigkeit-Zeit-Funktion dargestellt.

$$h(t) = R \cdot \sin[\varphi(t)] + \sqrt{L^2 - \{q + R \cdot \cos[\varphi(t)]\}^2} \quad (2-3)$$

$$\dot{h}(t) = R \cdot \dot{\varphi}(t) \cdot \left[\cos[\varphi(t)] + \frac{\sin[\varphi(t)] \cdot \{q + R \cdot \cos[\varphi(t)]\}}{\sqrt{L^2 - \{q + R \cdot \cos[\varphi(t)]\}^2}} \right] \quad (2-4)$$

Bei dem in der Abbildung 2-19 gezeigten Gerät ließen sich folgende geometrische Parameter des Kurbeltriebs identifizieren:

Kurbelradius $R = 1,75 \text{ mm}$

Schubstangenlänge $L = 60 \text{ mm}$

Für die analytische Untersuchung wurde für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Messungen am Zugankerantrieb die Stechfrequenz von $104,773 \text{ Hz}$ übernommen. Zusätzlich wurde die Schränkung als Parameter der Hubeinstellung, bzw. der Beeinflussung der Geschwindigkeit im Bereich von $q = 0 \text{ mm}$ bis $q = 10 \text{ mm}$ variiert.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 2-21 dargestellt. Eine negative Geschwindigkeit ist der Einstech-, eine positive der Rückholbewegung zuzuordnen. Als Gehäuse-Bezugskante wurde der obere Totpunkt bei einer Schränkung von $q = 10 \text{ mm}$ herangezogen. Bei dieser Einstellung wird angenommen, dass die Nadelspitze für alle Schränkungen ausreichend weit in das Gehäuse zurückkehrt, um die Haut an der Gehäusekante abzustreifen und erneut Pigmentlösung anzunehmen. Wie man erkennt, bedingt die auf einem Intervall von $10 \text{ bis } 0 \text{ mm}$ abnehmende Schränkung q nur eine geringe Zunahme des maximalen Nadelherausstands von weniger als 1 mm . Der Nadelhub variiert noch geringer, sodass die Schränkung als integrierte Einstellung für den Nadelherausstand oder den Nadelhub ungeeignet erscheint.

Der Abbildung 2-21 ist außerdem zu entnehmen, dass die unter den getroffenen Annahmen zu erzielende maximale Stechgeschwindigkeit bei etwa $1,2 \text{ m/s}$ liegt.

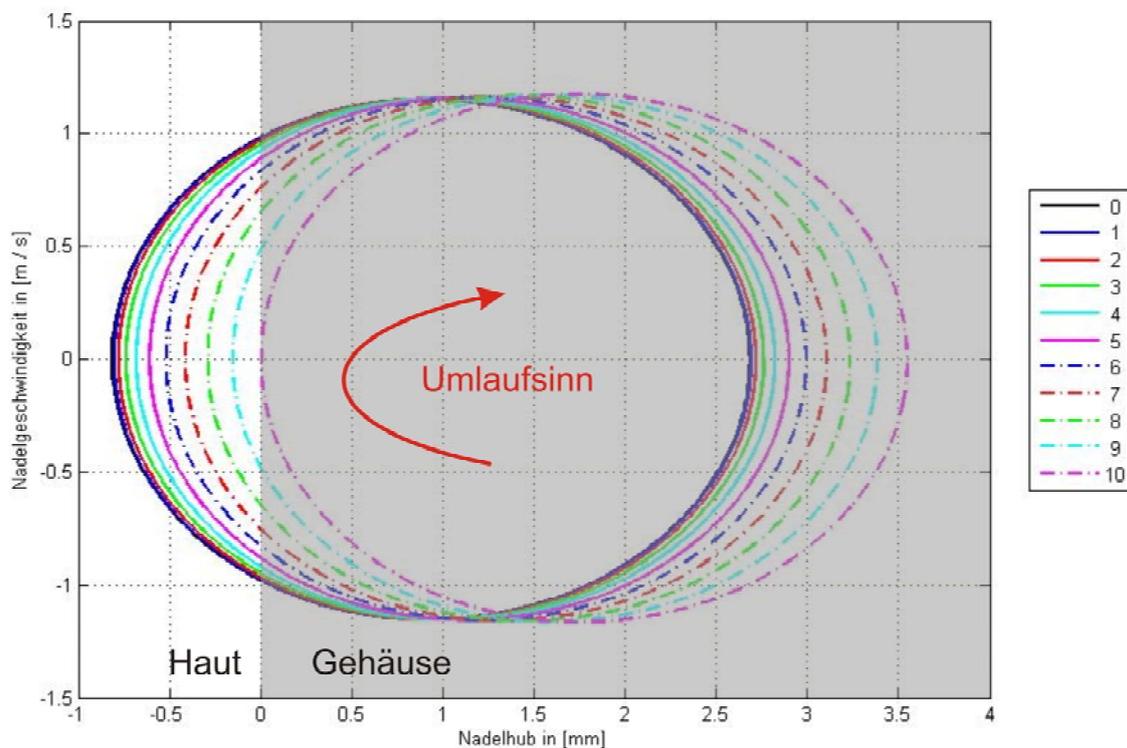


Abb. 2-21 Geschwindigkeits-Weg-Funktion für verschiedene Schränkungen eines Kurbeltriebs für eine Stechfrequenz von $104,773 \text{ Hz}$, analytische Ergebnisse

Setzt man die Schränkung q in (2-3) und (2-4) gleich Null, erhält man mit (2-5) und (2-6) die funktionalen Zusammenhänge für den allgemein üblichen Fall des ungeschränkten Kurbeltriebs.

$$h(t) = R \cdot \sin[\varphi(t)] + \sqrt{L^2 - \{R \cdot \cos[\varphi(t)]\}^2} \quad (2-5)$$

$$\dot{h}(t) = R \cdot \dot{\varphi}(t) \cdot \left[\cos[\varphi(t)] + \frac{\sin[\varphi(t)] \cdot R \cdot \cos[\varphi(t)]}{\sqrt{L^2 - \{R \cdot \cos[\varphi(t)]\}^2}} \right] \quad (2-6)$$

Die Abbildung 2-22 zeigt den Einfluss des Hubs ($= 2 \cdot R$) im Bereich zwischen zwei und fünf Millimetern auf die Geschwindigkeits-Weg-Funktion bei einer festen Pleuellänge $L = 60$ mm und einer Arbeitsfrequenz von 100 Hz. Dabei wurden die analytisch ermittelten Ergebnisse für eine bessere Bewertung auf den Punkt des maximalen Nadelherausstands bezogen, da dieser für den Anwender bei seiner künstlerischen Arbeit maßgeblich ist. Der Umlaufsinn ist gleich dem Uhrzeiger, negative Geschwindigkeiten werden der Stechbewegung, positive der Rückholbewegung zugeordnet.

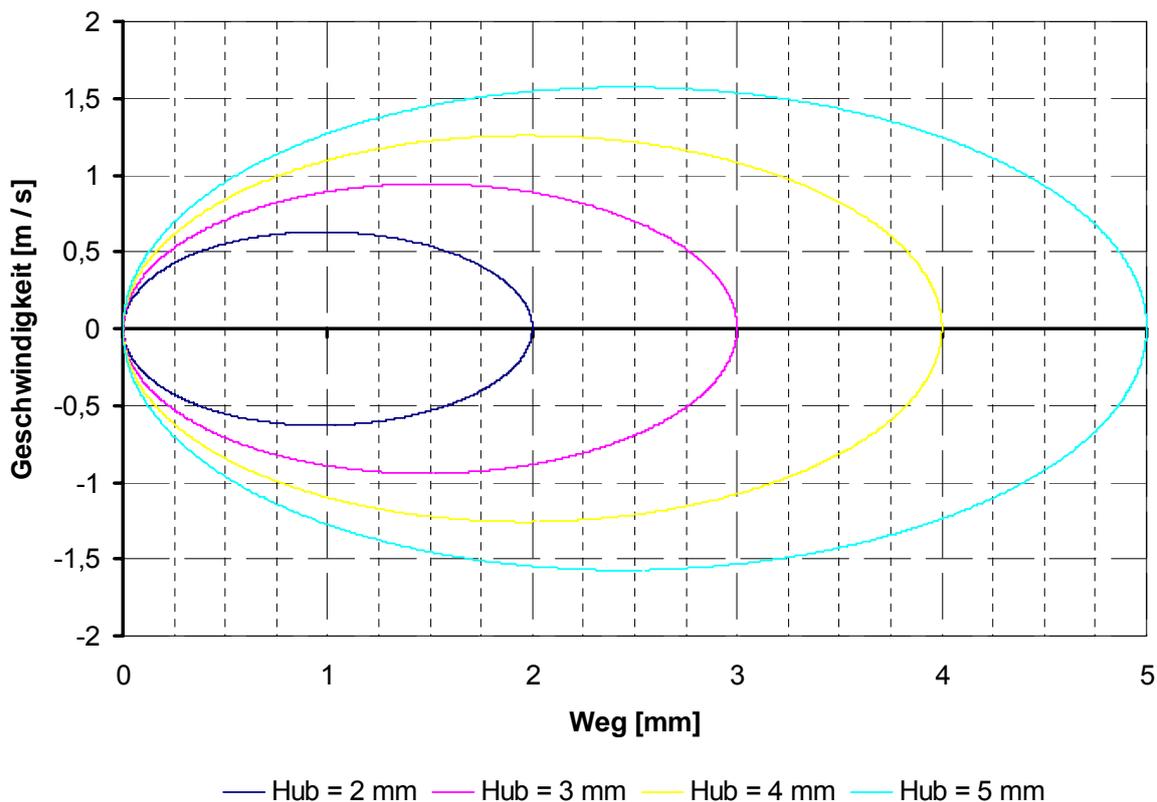


Abb. 2-22 Geschwindigkeits-Weg-Funktion der Nadelspitze eines Kurbeltrieb-Stechaktors bei variablem Hub und $f = 100$ Hz, bezogen auf den Punkt des maximalen Nadelherausstands

Man erkennt, dass mit zunehmendem Hub die Auftreffgeschwindigkeit der Nadel für einen festen Abstand vom vorderen Totpunkt ($= 0$ mm) zunimmt. Damit zeigt sich der Vorteil eines Stechgeräts mit großem Hub, insbesondere für das Arbeiten auf schlecht vorzuspannender

Haut mit weichem Hautuntergrund, beispielsweise bei der Behandlung der Lippenpartie im Gesichtsbereich, siehe hierzu die Ausführungen im Kapitel 4.1.

Taumelscheiben-Antrieb

Einen weiteren Standardantrieb im Pigmentierbereich stellt der Taumelscheibenantrieb dar. Er weist den Vorteil der axialen Anordnung von Motor- und Stechachse auf. Die Gerätegenerationen Swashdrive® der Firma Swashdrive Tattoo Machines basierten auf einem Taumelscheibenantrieb und wiesen einen deutlichen Parallelversatz der Motorwelle-Nadel-Achsen und einen als Federelement fungierenden elastischen Umlenkhebel auf. Dieser bewirkt im lastfreien Resonanzfall einen vergrößerten Nadelhub gegenüber dem Taumelscheibenhub und damit die Möglichkeit einer begrenzten selbsttätigen Anpassung der Nadelamplitude an den Untergrund oder die Belastung beim Tätowieren, siehe die Abbildungen 2-23 und 2-24. Im Gegensatz zum Original wurden bei der schematischen Darstellung das oben gelegene Motorwellenlager nicht und der Taumelring als ein das Lager umgreifendes Bauteil dargestellt.



Abb. 2-23 Tätowiergerät Swashdrive Gen 7 der Firma Swashdrive Tattoo Machines auf der Basis eines Taumelscheiben-Antriebs (ohne Nadel und Griffstück) [Swash12]

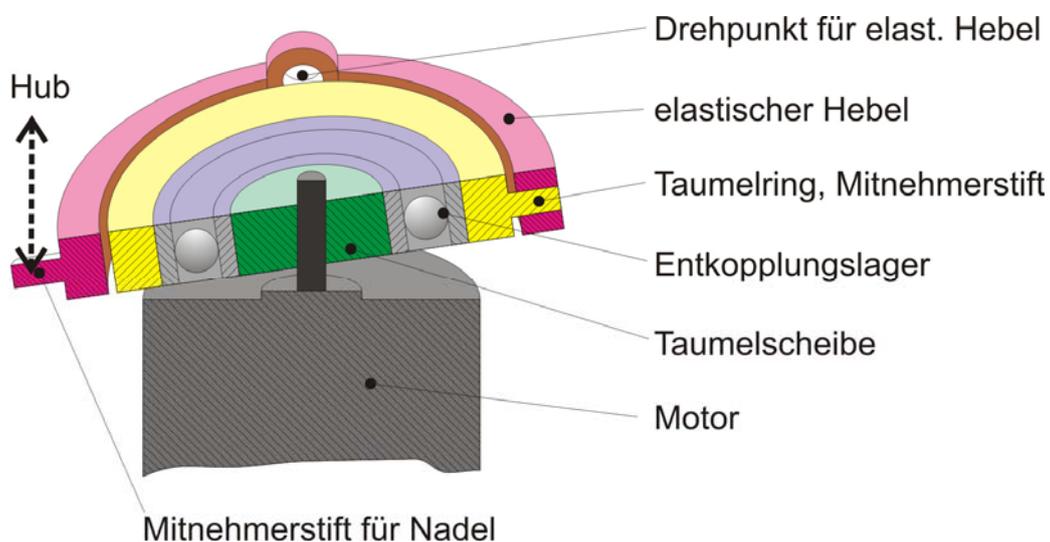


Abb. 2-24 Schematischer Aufbau des Swashdrive-Taumelscheibenantriebs mit elastischem Hebel

Bei axialen Ausführungen besteht die Taumelscheibe meist aus einer zylindrischen Scheibe, die eine von der horizontalen Zylinderquerebene um einen Winkel $\hat{\alpha}$ abweichende Bohrung durch den Scheibenschwerpunkt zur Befestigung auf der Antriebswelle besitzt. Die Taumbewegung der Scheibenebene wird durch geeignete Lagerung von der Drehbewegung entkoppelt, sodass durch eine Verdrehsicherung des äußeren Teils eine axiale Bewegung abgegriffen werden kann.

Bei einem Gerät der Firma MT.DERM für Permanent-Make-Up wurden am Taumelscheibenantrieb ein Anstellwinkel $\hat{\alpha} = 9^\circ$ (Amplitude) sowie ein Radius $R = 5,9 \text{ mm}$ für den Abgreifpunktabstand gemessen, vergleiche hierzu die Abbildung 2-26.



Abb. 2-25 Taumelscheibenantrieb eines zerlegten PMU-Geräts der Firma MT.DERM

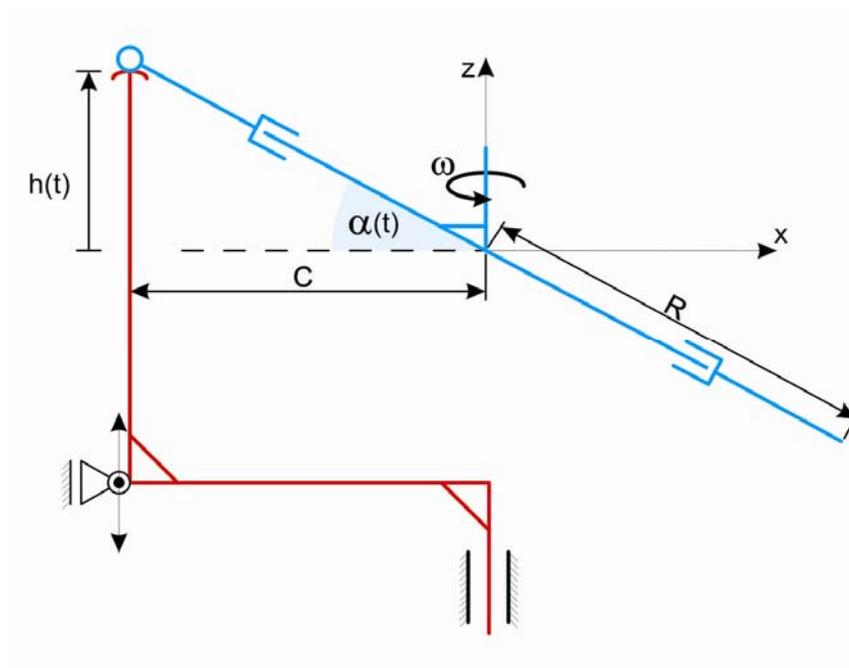


Abb. 2-26 Funktion eines Taumelscheibenantriebs

Analytisch lassen sich zwei Fälle unterscheiden. Beim ersten Fall wird angenommen, dass der Kolbenstößel, welcher die Hubbewegung von der Taumelscheibe entkoppelt, gelenkig mit der

Taumelscheibe verbunden ist, wodurch sich ein fester Radius R bei variablem Achsabstand C ergibt. Hierbei handelt es sich um einen hypothetischen Fall, da dies konstruktiv schwer zu realisieren ist und keine nennenswerten Vorteile bietet, die dies rechtfertigen können, wie die Ergebnisse zeigen. Beim zweiten Fall wird angenommen, dass sich der Kolbenstößel in festem Achsabstand C bei variablem Berührungspunkt R zur Motorachse befindet, was der üblichen konstruktiven Lösung entspricht. Beide Fälle wurden analytisch untersucht, vergleiche die Abbildungen 2-26 und 2-27.

Die Taumelscheibe wird mit einer konstanten Kreisfrequenz ω gedreht. Der Zusammenhang zwischen $\alpha(t)$ und $\varphi(t)$ lässt sich nachfolgend darstellen:

$$\alpha(t) = \hat{\alpha} \cdot \sin[\varphi(t)] \quad (2-7)$$

Hierbei sind $\alpha(t)$ der zeitabhängige Anstellwinkel in der Abtriebsstößel-Motorwellenebene und $\hat{\alpha}$ der maximale Anstellwinkel. Für den ersten Fall mit festem Radius R und variablem Achsabstand C ergeben sich folgende formale Zusammenhänge:

$$h(t) = R \cdot \sin\{\hat{\alpha} \cdot \sin[\varphi(t)]\} \quad (2-8)$$

$$\dot{h}(t) = R \cdot \hat{\alpha} \cdot \dot{\varphi}(t) \cdot \cos\{\hat{\alpha} \cdot \sin[\varphi(t)]\} \cdot \cos[\varphi(t)] \quad (2-9)$$

Für den zweiten Fall mit festem Achsabstand C und variablem Radius R ergeben sich folgende formalen Zusammenhänge:

$$h(t) = C \cdot \tan\{\hat{\alpha} \cdot \sin[\varphi(t)]\} \quad (2-10)$$

$$\dot{h}(t) = \frac{C \cdot \hat{\alpha} \cdot \dot{\varphi}(t) \cdot \cos[\varphi(t)]}{\cos^2\{\hat{\alpha} \cdot \sin[\varphi(t)]\}} \quad (2-11)$$

Die Weg-Winkel-Beziehungen beider Fälle wurden für die bekannten geometrischen Parameter $\hat{\alpha} = 9^\circ$ und $R = 5,9$ mm sowie für eine Stechfrequenz von 104,773 Hz in MATLAB® modelliert. Anschließend wurden die Analysedaten in Excel® importiert und bearbeitet, sodass nachfolgende Geschwindigkeits-Weg-Beziehungen erhalten wurden. Negative Geschwindig-

keiten werden der Einstechbewegung zugeordnet, positive der Rückholbewegung. Der Umlaufsinn ist der Uhrzeigersinn, wobei die größte Stechtiefe als Bezugslage gewählt wurde.

Man erkennt, dass sich beide Fälle nur im mittleren Bereich des Nadelhubs gering unterscheiden, sodass sich eine konstruktive Umsetzung des ersten Falls gegenüber dem zweiten keineswegs rentiert. Die maximale Stechgeschwindigkeit beträgt nur etwa 0,65 m / s, der Gesamthub etwa 1,95 mm.

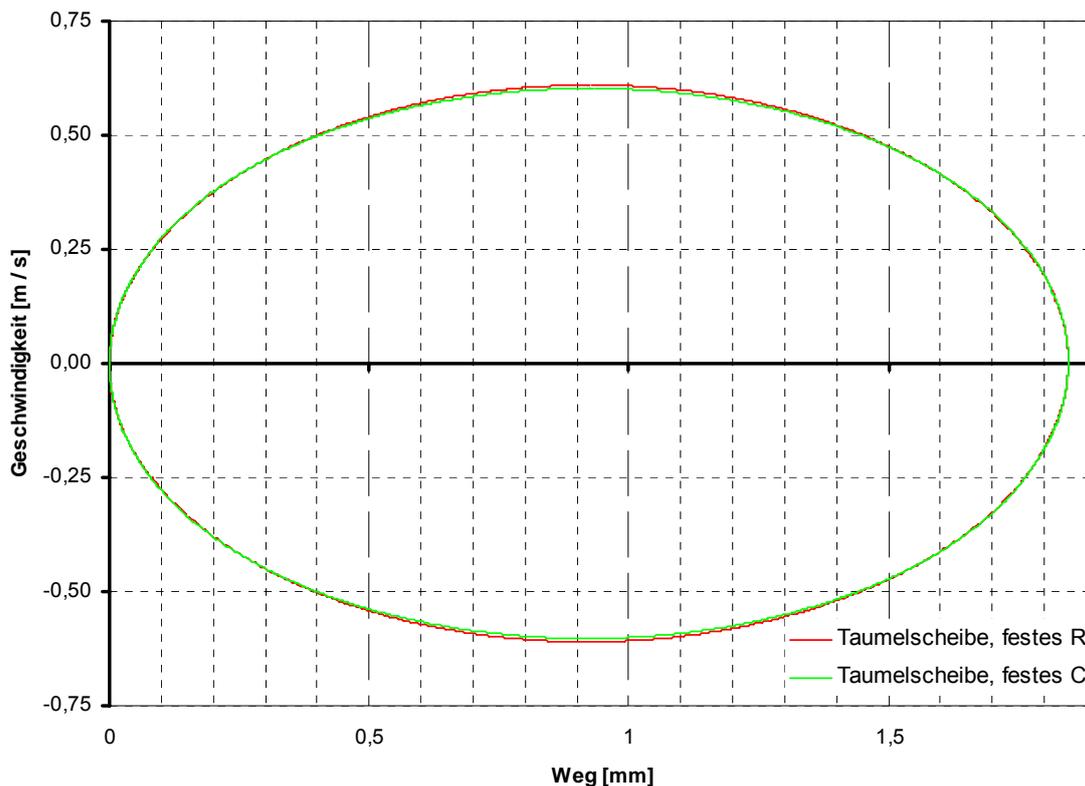


Abb. 2-27 Darstellung der Daten aus der analytischen Betrachtung des Taumelscheibenantriebs bei einer Stechfrequenz von 104,773 Hz

Weitere bekannte Möglichkeiten für den Substanzeintrag in die Haut

Ein oben genannter Nachteil bei der Verwendung von Pigmentiergeräten mit einer Anordnung massiver Nadeln besteht darin, dass die Flüssigkeit, wie bei der Bifurkationsnadel, durch adhäsive Benetzung an der Nadeloberfläche haftet und beim primären Einstechvorgang teils am Wall des Stechkanals von der Nadelspitze abgestreift wird. Die Flüssigkeit gelangt dabei nur in begrenztem Maß beim primären Stich in die vorgesehene Hautschicht, weshalb mehrere Stiche an einer Stelle ausgeführt werden müssen. Erst damit wird ein ausreichender Farbstoff- oder Flüssigkeitseintrag je Stechstelle erhalten. Daraus resultiert eine Forderung nach möglichst hoher Stechfrequenz bei mäßig schneller Wischbewegung der Gehäusemündung über die Hautoberfläche durch den Anwender. Dem entgegen steht eine Art Perforations- oder Schneidwirkung bei zu geringem seitlichem Abstand zwischen den Einzelstichen unter der Annahme, dass jede Stechbewegung einen primären Stechkanal erzeugt. Tatsächlich besitzen die Nadelanordnungen ein gewisses seitliches Spiel, und es konnte im Highspeed-

Video beobachtet werden, dass die Nadeln während einer im Verhältnis zur Stechfrequenz geringen horizontalen Geschwindigkeit der Gehäusemündung und aufgrund der elastischen Verformung der Haut mehrfach in den primär eröffneten Stechkanal gleiten, bevor ein weiterer Stechkanal eröffnet wird.

Ein aktuelles Forschungsthema am Fachgebiet Mikrotechnik der TU Berlin ist das Impfschneiden, angemeldet als deutsches Patent [Loth08]. Dabei wird die für das zuvor beschriebene DNS-Impfen interessierende Hautschicht durch horizontale Schnitte statt durch vertikale oder schräg verlaufende Stiche zugänglich gemacht. Das Verfahren wird hier nicht näher betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit, Substanzen in die Haut einzutragen, besteht in einer Laservaporisation kleiner, umschriebener Bereiche der Epidermis. Dabei wird z. B. in dem Handgerät LEDDT™ (Laser Easy Drug Delivery Technology) der Firma Pantec Biosolutions AG ein energiereicher, gepulster Laserstrahl über einen so genannten Scanner, einem in begrenztem Winkel kardanisch schwenkbaren Oberflächen-Umlenkspiegel, durch ein Auflagefenster auf die Haut geleitet, wodurch eine Vielzahl von zylinderförmigen Kratern in der Epidermis entsteht, siehe die Abbildungen 2-28 und 2-29. Diese Technologie wird vom Unternehmen P.L.E.A.S.E. genannt, ein Akronym für „Painless Laser Epidermal System“. Bei dem Verfahren verdampfen lediglich die obersten Schichten der Epidermis, und es werden Krater-Durchmesser von 200 µm erhalten, deren Grund nahe an die Papillarschicht heranreicht. In der Abbildung erkennt man am mikroskopischen Schnitt, dass bei einem Lasereintrag die Epidermis und damit auch das Stratum spinosum entfernt wurde. Die so erzeugten Flächen des Zylinders können von der Applikationsflüssigkeit benetzt und penetriert werden. Es liegen keine Informationen vor, inwieweit die dendritischen oder Langerhans-Zellen in der umliegenden Epidermis durch den Energieeintrag geschädigt und damit das Verfahren nur begrenzt für das DNS-Impfen geeignet erscheint. Das Verfahren wird aktuell vor allem für die transkutane Applikation von hochmolekularen Substanzen verwendet. [PanB10], [MeGa08].

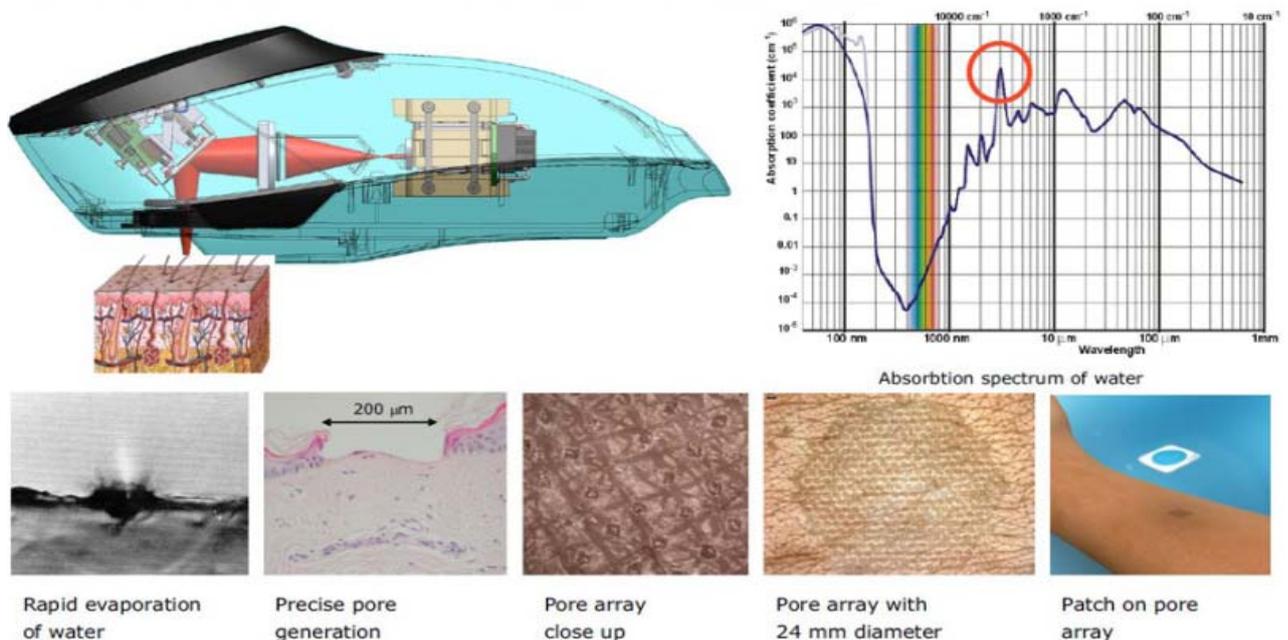


Abb. 2-28 P.L.E.A.S.E.-Technologie der Firma Pantec Biosolutions AG [PanB10]

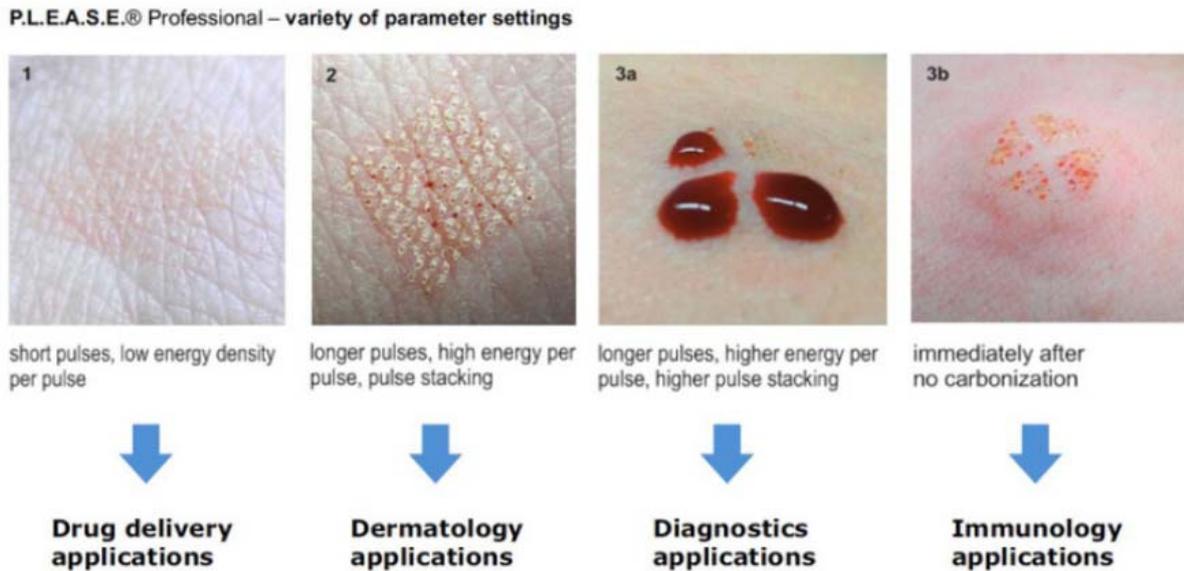


Abb. 2-29 Auswirkung der Parameter Impulsenergie und Dauer bei der P.L.E.A.S.E.-Technologie der Firma Pantec Biosolutions AG und mögliche Anwendungen [PanB10]

Beim **Nadelcluster** wird mittels Mikrostrukturierung ein Nadelkissen erzeugt, welches an ein mikroskopisches Fakirbrett erinnert. In der Abbildung 2-30 links zeigen scanelektronenmikroskopische (SEM-) Bilder Mikronadelarrays von solitären (massiven) Einzelnadeln, die aus verschiedenen Materialien hergestellt wurden [McAl03]. (A) zeigt im Detail eine 150 µm hohe Nadel eines aus einem Siliziumträger geätzten 400-Nadelarrays, (B) zeigt einen Ausschnitt eines 160.000-Silizium-Nadelarrays mit 25 µm Nadelhöhe. (C) zeigt durch Elektroabscheidung (Galvanoplastik) auf einer Kunststoffform erzeugte Metall-Mikronadeln von je 120 µm Höhe, (D–F) zeigen 100-Nadelarrays aus biologisch abbaubaren Polymeren mit abgeschrägter Spitze, hergestellt durch das Füllen von Kunststoffformen: (D) zeigt 400 µm-Nadeln aus Polylaktatsäure (PLA) mit flach abgeschrägter Spitze, (E) zeigt eine gewölbt-abgeschrägte Spitze einer 600 µm hohen Nadel aus Polyglykolsäure (PGA), (F) zeigt eine ebensolche Nadel aus gleichem Material, jedoch 400 µm hoch sowie mit einer über die gesamte Länge eingezätzten Nut. In der Abbildung 2-30 rechts sind SEM-Bilder von Hohlmikronadelarrays der gleichen Quelle zu sehen, die wie zuvor aus verschiedenen Materialien hergestellt wurden. Bild (A) zeigt geradwandige Metall-Mikronadeln eines 100-Nadelarrays mit einer Höhe von 200 µm, das durch Elektroabscheidung auf einer Polymerform hergestellt wurde, (B) zeigt 900 µm der Spitze einer spitz zulaufenden, abgeschrägten Glasmikronadel, die mit einem konventionellen Mikropipettenzieher hergestellt wurde. Als Beispiel für ein solches Gerät sei das PU-Sa-2V der Firma Helmut Saur, Laborbedarf genannt [Saur10]. Das Bild (C) zeigt eine konisch zulaufende, 500 µm hohe Metall-Mikrohohlnadel eines 37-Nadelarrays, welches durch Elektroabscheidung auf einer Polymerform hergestellt wurde. (D) zeigt ein solches 37-Nadelarray im Größenvergleich zu einer 26 G (Gauge) Subkutankanüle, die einen Außendurchmesser von 0,45 mm aufweist [WiKa10].

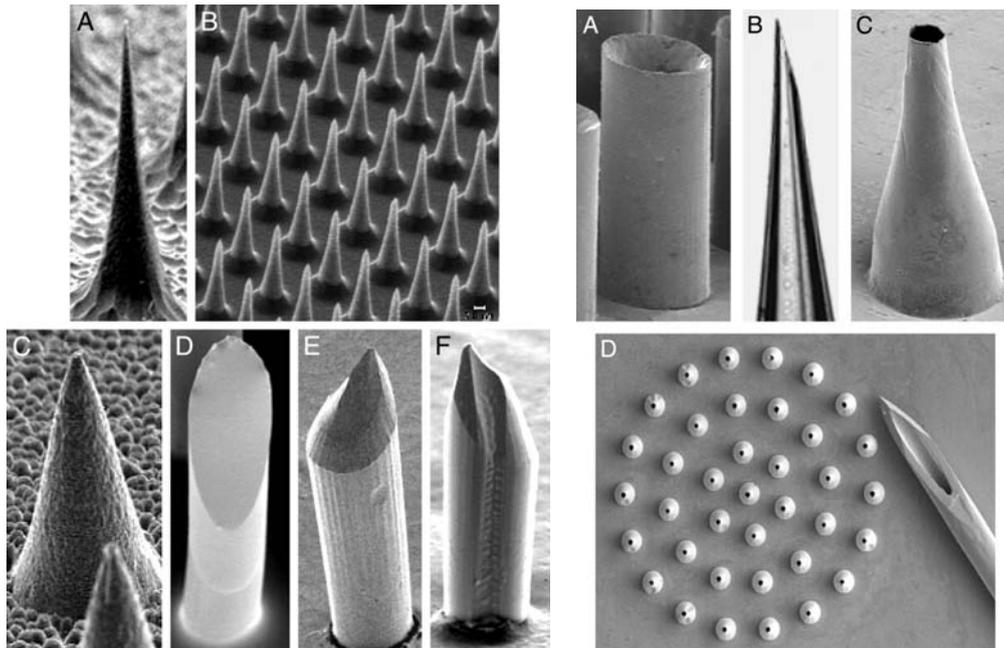


Abb. 2-30 SEM-Bild solitärer (links) und Hohl-Mikronadeln (rechts) aus verschiedenen Materialien, Beschreibung siehe Text [McAl03]

Eine weitere Möglichkeit der Herstellung solcher Mikronadelarrays zeigt die Abbildung 2-31. Hier ist im Bild rechts gut zu erkennen, dass die Nadeln aus dünnem Blech strukturiert und gebogen wurden. Dies hat gegenüber den in der Abbildung 2-30 gezeigten Nadeln den Vorteil, dass es sich bereits um ein solides Ausgangsmaterial handelt, und das Nadelkissen deutlich einfacher herzustellen ist. Dem gegenüber ist die Miniaturisierung der Nadeln begrenzt. Die gezeigte Nadelhöhe ist mit 600 µm die kleinste angebotene des Herstellers.

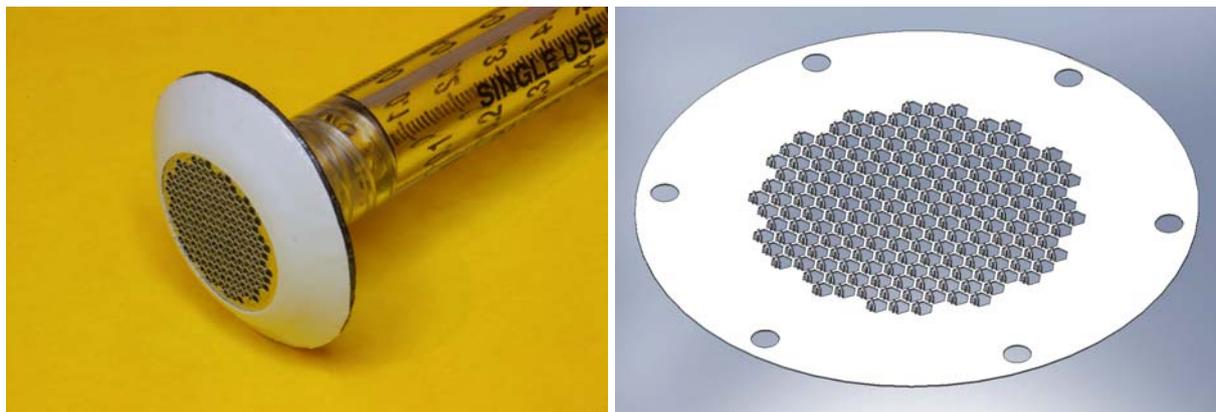


Abb. 2-31 Links Applikationsstift AdminPen 0600 auf der Basis eines Mikronadelarray AdminPatch 0600 mit 0,6 mm Nadelhöhe (rechts) der Firma AdminMed [AMed12]

Problematisch stellt sich die Anwendung der gezeigten Mikronadelarrays dar. Sie müssen möglichst senkrecht in die Haut gedrückt werden, wodurch sich die erforderliche Kraft mit der Anzahl der Nadeln im Array vergrößert. Zudem ist aufgrund des Hautausweichens bei fehlender oder stumpfer Nadelspitze zu erwarten, dass die Nadeln nicht auf ihrer gesamten Länge in die Haut eindringen. Es liegen derzeit keine Angaben über die erzielbaren Toleranzen bei den Stechtiefen vor. Des Weiteren besteht bei sprödem Nadelmaterial eine Bruchgefahr, wenn auf das Mikronadelarray nicht nur senkrechte Lasten wirken. Die Bruchstücke

verbleiben in der Haut und können dort unerwünschte Fremdkörperreaktionen verursachen. Der Herstellungsaufwand wird für die geätzten oder elektrolytisch hergestellten Nadelarrays als mittel bis hoch angesehen.

Der **Nadelroller** verfügt über eine drehbare Walze, die mit herausstehenden Nadeln versehen ist. Diese wird meist mit leichtem Druck manuell über die Haut gerollt, wodurch die Nadeln mit Hautkontakt begrenzt in diese eindringen. Je nach Modell ist die Nadellänge verschieden, wodurch sich der Effekt der Behandlung einstellen lässt. Der begrenzte Durchmesser der Walze und die notwendige Länge der Nadeln bedingen, dass die Nadeln beim Ein- und Austritt keine reine Stechbewegung ausführen, wodurch ein unsauberes Stechbild und damit keine regelmäßigen Stechkanäle zu erwarten sind, eher eine Art Aufreißen oder Aufschaukeln. Möglicherweise wird dadurch die Menge der applizierten Flüssigkeit erhöht. Der in der Abbildung 2-32 gezeigte Dermaroller MC915 für medizinische Anwendungen besitzt 18 Nadelreihen zu je 9 Nadeln bei einem Walzendurchmesser von 20 mm, einer Arbeitsbreite von 17 mm und einer produktionstechnisch fest vorgegebenen Nadellänge von 1,5 mm Länge.



Abb. 2-32 Dermaroller MC915 (1,5 mm) der Firma Dermaroller GmbH

Insgesamt wird, wie beim Tätowieren auch, beim solitären Nadelcluster, beim Nadelarray und beim Derma- oder Meso-Roller der Wirkstoff an den Nadeln adhäsiv gebunden und in die Haut transportiert. Damit ergeben sich die oben dargestellten Probleme beim Wirkstoffeintrag.

DermaFrac ist ein aktuell auf dem Markt präsentiertes Verfahren, welches gewisse Ähnlichkeiten zum Nadelroller aufweist [Dany11]. Hier wird in einem transparenten Einwegmodul eine mit Mikronadeln besetzte Rollwalze drehbar gelagert. Das Gehäuse weist im Bereich der Hautauflagefläche eine Öffnung auf, durch welche die Haut mittels Vakuum gegen das Nadelrad vom umliegenden Umgebungsdruck gepresst wird. Die bei der Anwendung ausgeführte stiftartige Rollbewegung des Geräts versetzt die Walze in eine Drehbewegung, wobei laut Hersteller die Nadeln in die Haut eindringen. Zudem befindet sich in der Gerätespitze ein Flüssigkeitsvorrat, welcher die Walze passiv umgibt. Dabei verhindert das Vakuum ein Abfließen der Flüssigkeit durch das Fenster. Dringt Nebenluft aufgrund des Vakuums ein, kann die Verwendung Schaum bildender Flüssigkeiten oder Wirkstofflösungen nachteilig sein, da

zum einen der Schaum zusätzlich den Totraum der Gerätespitze ausfüllt und zum anderen leichter in den Ansaugtrakt der Vakuumpumpe gelangen kann. Dem entgegen ist denkbar, dass ein stabiler Schaum besonders vorteilhaft ist, um die Flüssigkeit am Auslaufen zu hindern und die Mikronadelwalze zu benetzen.



Abb. 2-33 Derma Frac der Firma Danycare [Dany12]

Für die Mesotherapie stehen Geräte verschiedener Hersteller zur Verfügung, die sich in ihrem Aufbau ähneln und das aktive Eintragen von Substanzen mittels Stechgeräten und aktiver Fluidik ermöglichen.



Abb. 2-34 Mesotherapie-Gerät U225 der Firma Biophymed

Alle weisen eine Lineareinheit auf, üblicherweise auf der Basis eines pneumatischen Kolbenantriebs, der eine repetitive Stechbewegung vorwählbarer Frequenz des Applikationswerkzeugs, meist einer einzelnen Hohlneedle, ausführt. Sie enthalten weiter eine Fluidikeinheit, die zum Stechvorgang synchronisiert eine bestimmte Fluidmenge, vorzugsweise über das Appli-

kationswerkzeug, abgibt. Ein Beispiel ist die Meso-Gun U225 der Firma BIOPHYMED®, siehe Abbildung 2-34.

Es lassen sich einige neue Verfahren für den intrakutanen Substanzeintrag finden, die durch ein Schutzrecht, wie z.B. ein Patent oder ein Gebrauchsmuster, bereits geschützt sind. Jedoch bleibt abzuwarten, ob sich diese Verfahren am Markt behaupten können. Der Erfolg eines Produkts ist bekanntermaßen nicht nur von der patentrechtlich geschützten Technologie oder dem zugehörigen Verfahren, sondern auch vom Marketing, der Vertriebsstruktur, der Investitionskraft des Patentinhabers und nicht zuletzt von den Bedürfnissen des Herstellers und des Anwenders sowie dessen Kaufbereitschaft abhängig. Beispielsweise sei ein aktuell veröffentlichtes Patent genannt, welches als Produkt noch nicht am Markt zu finden ist und bei dem die Erfindung darin besteht, dass die Drehbewegung einer Hautauflagerolle dafür genutzt wird, um die darin radial beweglichen Nadeln, insbesondere Kanülen, über eine zu überlaufende Nocke vorübergehend in die Haut zu treiben und während dessen eine Verbindung mit einem Druck beaufschlagten Reservoir herzustellen, sodass über die Kanüle Flüssigkeit appliziert wird, siehe Abbildung 2-35. Ein weiterer Vorschlag bezieht sich auf ein System, bei dem die Hautoberfläche durch eine Reibfläche an einem Zugstreifen geöffnet und die Substanz über ein aufzuklebendes Patch an diese Stelle gebracht wird, siehe Abbildung 2-36.

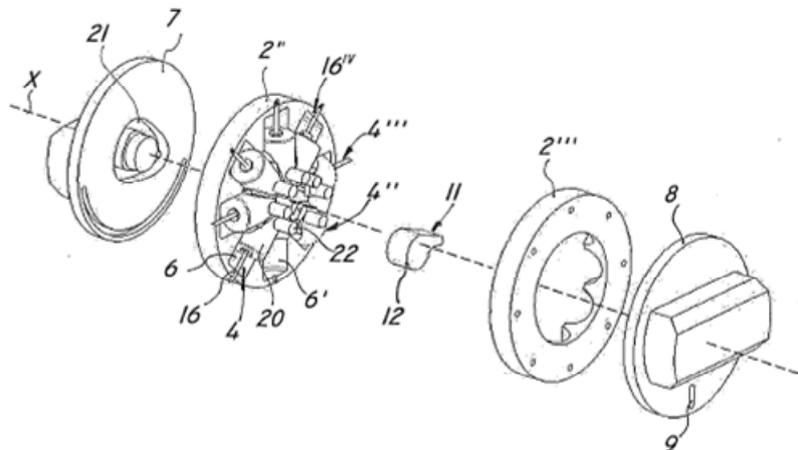


Abb. 2-35 Gerät zum wiederholten aktiven Injizieren in Haut mittels einer Rolle und Steuernocke [Assa08]

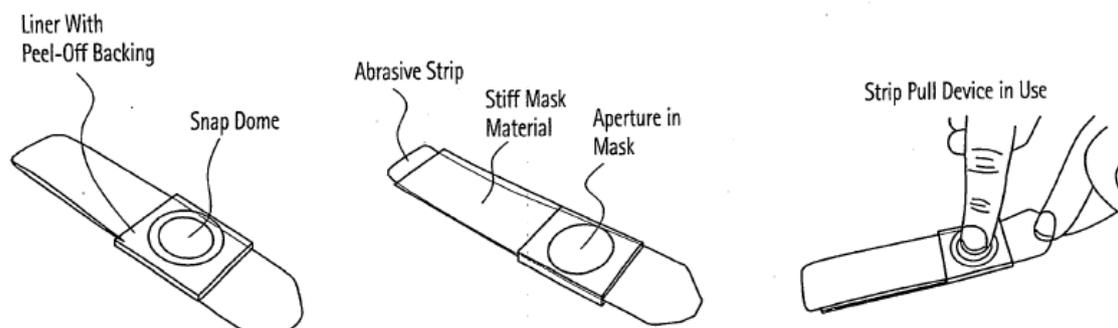


Abb. 2-36 Beispielgrafik aus dem Patent EP 2258441A2 für ein Gerät zum Eröffnen von Hautschichten und Einbringen von Medikamenten oder Impfstoffen [Inter06]

Neben den vor allem betrachteten mechanisch-invasiven Verfahren gibt es eine große Vielzahl an Möglichkeiten, den Substanzeintrag in bzw. durch die Epidermis zu beeinflussen. Die Abbildung 2-37 zeigt beispielhaft eine schematische Zusammenstellung, die sich sicher leicht erweitern lässt.

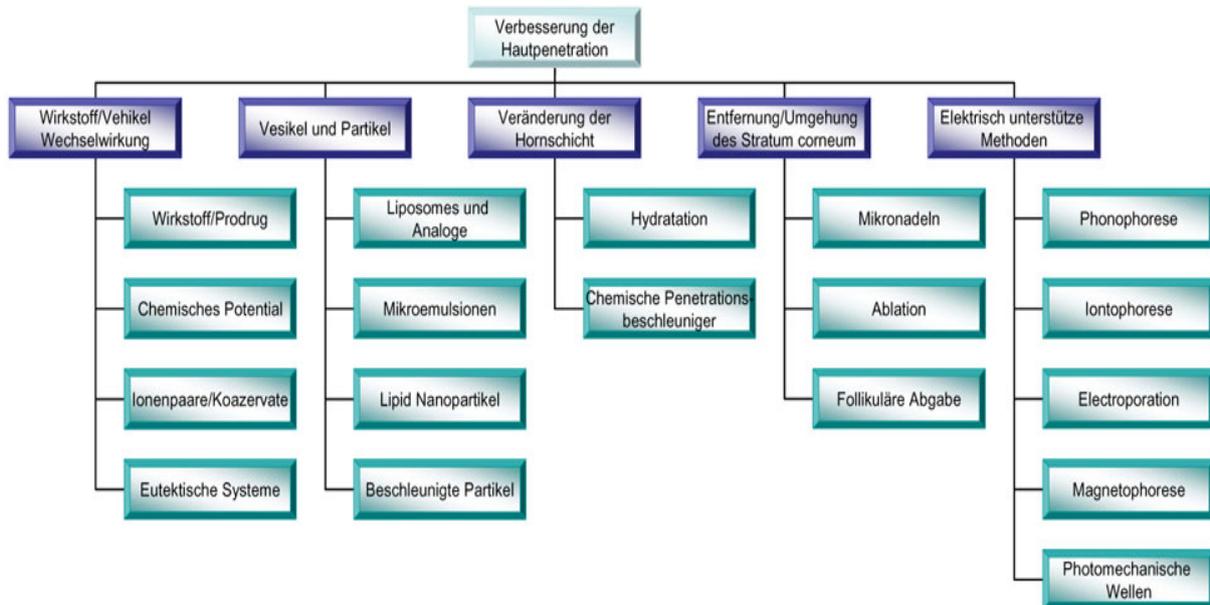


Abb. 2-37 Möglichkeiten zum verbesserten Einbringen von Substanzen in die Haut [Skip12]

3 Das Gewebeausweichen beim Punktieren von menschlicher Haut

Die Haut ist das größte Organ des menschlichen Körpers. Bei der passiven Abwehrfunktion nimmt die äußere Hautschicht, die Epidermis, eine Schlüsselrolle ein, da ihr vielschichtiger Aufbau eine wirkungsvolle mechanische Barriere gegen das Eindringen höhermolekularer Stoffe oder von Mikroorganismen darstellt. Bei der Mehrzahl der kosmetischen und medizinischen Hautbehandlungen wird versucht, diese mechanische Barriere durch Nadelanordnungen zu durchdringen. Insgesamt besteht dabei das Problem, dass die Haut der eindringenden Nadel ausweicht, sodass es auf herkömmliche Weise nur schwer möglich ist, die vorgewählte Stech- oder besser Applikationstiefe genau einzuhalten. Dies verdeutlicht die Abbildung 2-5 auf der Seite 12.

Das strukturierte Herangehen an das Problem des Gewebeausweichens bei penetrierenden Applikationen lässt sich in drei methodische Ansätze gliedern. Erste Methode: man kann das Hautausweichen durch geeignete konstruktive Maßnahmen reduzieren oder verhindern. Zweite Methode: es gelingt, das Hautausweichen abhängig von überwachten Parametern beschreibbar zu machen, sodass es beim Einstellen der Stechtiefe berücksichtigt werden kann. Dritte Methode: die gewünschte Stechtiefe wird durch geeignete konstruktive Maßnahmen trotz Hautausweichens erreicht. Nachfolgend werden diese drei Ansätze und die grundlegenden Ideen dabei näher beleuchtet.

3.1 Reduktion oder Vermeiden des Ausweichens

Allgemein lässt sich beim Einstechen einer Nadelanordnung in die Haut das Hautausweichen durch eine genügend große Einstechgeschwindigkeit, möglichst dünne Nadeln und günstige Nadelspitzengeometrien sowie durch eine zusätzliche Hautvorspannung mindern oder sogar verhindern. Eine solche Hautvorspannung muss zusätzlich vom Anwender, z.B. durch eine entsprechende manuelle Manipulation durch das bekannte Daumen-Zeigefinger-Spreizen, das Umgreifen des Arms von der der Punktionsstelle gegenüberliegenden Seite oder vom Stechgerät durch geeignete konstruktive Maßnahmen bzw. durch zusätzliche aktive Teile erzeugt werden [ZwBe08].

Aktuelle, marktübliche Pigmentiergeräte weisen beispielsweise eine relativ geringe Stechgeschwindigkeit bei hoher Arbeitsfrequenz (typischerweise 0,5 bis 1,2 m / s bei 100 Hz) auf, sodass neue Aktoren notwendig werden, will man die Stechgeschwindigkeit antriebseitig steigern. Dies würde jedoch für den Anwender eine hohe finanzielle Belastung beim Umstieg auf das neue Stechgerät und damit einen Nachteil für dessen Marktrelevanz bedeuten. Alternativ ist ein Verbrauchsmodul für das bisherige Stechgerät denkbar, bei dem die bei einer Aktorperiode abgegebene Energiemenge über mehrere Perioden in einem elastischen Element gesammelt, zwischengespeichert und nach einer definierten Anzahl als Abtriebsbewegung abgegeben werden - eine Art mechanischer Kaskade mit Frequenzteilung.

Das Hautausweichen kann durch weitere hier entwickelte und untersuchte Konzepte vermindert oder vermieden werden, bei denen die Haut festgehalten oder die Oberflächenspannung, bzw. die Steifigkeit erhöht werden, z. B. durch einen zusätzlich aufgetragenen Unterdruck, eine Greif- oder Spannvorrichtungen, eine auf der Hautoberfläche angebrachte Versteifungs- oder Masseschicht. Diese werden im Detail weiter unten vorgestellt und untersucht.

Ähnlich dem Stechverhalten Blut saugender Parasiten lässt sich der Stechbewegung der Nadel eine Schwingung kleiner Amplitude überlagern, um die Haut-Nadel-Wechselwirkungen und darüber das Hautausweichen zu verringern, z. B. durch ein besseres Gleiten der Nadel an der Stechkanalwand [Knit99]. Dabei wird sowohl an eine axiale als auch eine radiale Schwingungsnormale gedacht. Zudem ist eine Drehschwingung um die Nadellängsachse während der Stechbewegung denkbar. Es ist zu erwarten, dass sich durch die hochfrequente mechanische Anregung das Schmerzempfinden durch eine Art Betäubungseffekt deutlich reduzieren lässt. Dies wäre ein besonderer Marktvorteil für die damit ausgestatteten Produkte. Bei der Entwicklung von schnellen Stechaktoren wird davon ausgegangen, dass es eine Einstechgeschwindigkeit in die Haut gibt, oberhalb derer das Ausweichen der Haut aufgrund der Massenträgheit der Haut vernachlässigbar klein ist.

Gelingt es nicht, eine solche Grenz-Einstechgeschwindigkeit zu finden und diese durch einen neu entwickelten Stechaktor mit markt- und praxistauglichem Aufbau bereitzustellen, ist eine Beschreibung der Relativbewegung zwischen Haut und Nadel eine Alternative. Damit ist es möglich, die einzustellende Stechtiefe aus der Sollstechtiefe durch eine Art „Vorhalten“, wie z. B. bei der Ballistik mit Seitenwind, zu berechnen und auszugeben.

3.2 Vorhalten durch prädiktives Beschreiben des Ausweichens

Während beim ersten Ansatz davon ausgegangen wird, dass die konstruktiven Lösungsvorschläge es ermöglichen, das Hautausweichen auf ein tolerables Maß zu minimieren oder zu verhindern, wird bei diesem Ansatz davon ausgegangen, dass es gelingt, das Hautausweichen abhängig von wichtigen Einflussgrößen, wie der Nadelgeometrie, der verwendeten Nadelanordnung, der aktuellen Nadelgeschwindigkeit, dem Geschwindigkeits-Weg-Profil des Stechaktors oder der Hautlokalisierung mathematisch oder durch Vorversuche empirisch beschreiben zu können.

Die dadurch erhaltenen Zusammenhänge werden als eine Art Kalibrierkennfeld in ein Rechensystem integriert, welches die gewünschte in eine einzustellende Stechtiefe umrechnet und diese vorzugsweise automatisch am Gerät einstellt.

3.3 Erreichen der Penetrationstiefe trotz Ausweichens

Mit freien Nadellängen von z. B. 0,3 mm für den epidermalen Wirkstoffeintrag ist eine Applikation mit herkömmlichen Kanülen, Durchmesser 0,3 mm, bei senkrechtem Einstechen ohne weitere Maßnahmen schlecht möglich. In der Praxis versucht man, dies durch Mik-

ronadeln zu beherrschen, deren Durchmesser deutlich darunter liegt. Es wird daher unter anderem ein flaches Stechen zur Hautoberfläche vorgeschlagen, bei dem die eingedrungene Nadel­länge gegenüber der (senkrechten) Applikationstiefe deutlich größer ist. Zudem kann hierbei ausgenutzt werden, dass das horizontale Hautausweichen konstruktiv leichter angegangen werden kann als das vertikale. Bereits eine herkömmliche Stechgerät-Hautauflage begrenzt die Hautverschiebbarkeit in horizontaler Richtung besser als in senkrechter Richtung.

Dieser Ansatz wird vor allem durch einen bei der Stechbewegung der Nadel mitgeführten Stechtiefenanschlag getragen. Dabei führt die Nadelanordnung eine Stechbewegung mit großem Nadelherausstand aus und wird durch einen dabei mitgeführten mechanischen Tiefenanschlag am Eindringen in die Haut über die eingestellte Stechtiefe hinaus gehindert. Dafür ist ein Stechgerät notwendig, welches einen ausreichenden Hub aufweist, sodass Antriebskonzepte, von diesem Standpunkt betrachtet, günstig erscheinen können, die aus anderer Sicht einen unnötig großen Hub aufweisen oder sonst nachteilige Eigenschaften besitzen, die angesichts des großen Hubs in den Hintergrund treten.

4 Entwicklung von Konzepten zur Beherrschung des Hautausweichens

Bei der Entwicklung eines Konzepts muss dieses nicht notwendigerweise ausschließlich einem der im vorangegangenen Kapitel aufgestellten drei methodischen Ansätze zuzuordnen sein. Vielmehr ist eine Lösung anzustreben, die das bestmögliche Resultat liefert, und möglicherweise wird dabei ein Konzept entwickelt, welches beiden oder allen drei genannten Ansätzen zuzuordnen ist.

Die Beherrschung des Hautausweichens stellt für das Erreichen des eigentlichen Entwicklungsziels, die Substanzabgabe auf eng tolerierter vertikaler Stechtiefe in Haut, nur eine Möglichkeit dar. Alternativen bestehen zum Beispiel darin, die Substanzabgabe während des Ein- bzw. Durchdringens der Nadel auf der Höhe einer gewünschten Hautschicht auszulösen. Dabei kann die Nadel durchaus tiefer in das Gewebe eindringen, lediglich die Substanzabgabe erfolgt in der gewünschten Hautschicht. Denkbar ist die mit dem Stechvorgang synchronisierte Abgabe der Flüssigkeitsmenge, sowohl beim Eindringen als auch beim Zurückweichen der Nadel, wobei die richtige Stechtiefe vom System ständig überwacht und korrigiert wird.

Das Ausweichen der Gewebeoberfläche kann durch viele Parameter des Stechvorgangs und der konstruktiven Gestaltung der Stechwerkzeuge sowie der Aktorik beeinflusst werden. So wird bei hoher Geschwindigkeit die Haut wegen ihrer Massenträgheit und Eigenspannung weniger ausweichen als bei niedriger Stechgeschwindigkeit. Zudem beeinflussen die Form der Werkzeugspitze, die Werkzeuggröße, die Oberfläche des Werkzeugs im Bereich der Interaktionsfläche mit einer eventuellen Beschichtung, vorhandene Bearbeitungsspuren oder daran gezielt angebrachte Oberflächenstrukturen, des Weiteren die Steifigkeit, die Elastizität, die Beschaffenheit, die Vorspannung oder die Masse der Haut, der Eindringwinkel des Werkzeugs zur Hautoberfläche und der Eindringpfad, die Richtung der Werkzeuglängsachse zur Eindringpfadtangente, der Hautuntergrund, die Anzahl der gleichzeitig eindringenden Werkzeuge und deren Abstand zueinander sowie viele weitere Faktoren das Ausweichen. Die Variation einiger Parameter wird nachfolgend in Ansätzen dargestellt, viele weitere lassen sich wegen ihrer individuellen Abhängigkeit, insbesondere vom Alter oder der Konstitution des zu behandelnden Lebewesens, nicht konstruktiv optimieren.

4.1 Ansatz: Stechgeschwindigkeit

Die Stechgeschwindigkeit wird als wesentlicher Parameter zur Verringerung des Hautausweichens betrachtet.

Besonders beim Tätowieren lässt sich beobachten, dass die gewählte Geräteeinstellung (Nadelherausstand, Arbeitsfrequenz) und die Führung der Gerätespitze über der Haut in gewissem Abstand zur Hautoberfläche die Stech-, bzw. besser die Auftreffgeschwindigkeit der Nadelspitzen auf die Haut wesentlich beeinflussen. Weiter oben wurde gezeigt, dass sich die Antriebskonzepte Kurbeltrieb oder Taumelscheibe („Rotary“-Maschinen) und Reluktanzkraft-

Zuganker (klassische „Spulen“- oder „Coil“-Maschinen) in ihren Geschwindigkeits-Weg-Funktionen unterscheiden, insbesondere bezüglich des Geschwindigkeitsabfalls auf den letzten Millimetern der Stechbewegung vor bzw. nach dem größten Nadelherausstand. Zusätzlich fordern die Tätowierkünstler vom Gerät mehr Hub bei gleicher Arbeitsfrequenz. Dies lässt sich aus technischer Sicht mit der Forderung nach einer Steigerung der Stechgeschwindigkeit unter der Annahme übersetzen, dass die Tätowierung als zweidimensionale, flächig verteilte Pigmentschicht in der Haut nicht in größerer Hauttiefe platziert und daher die Nadelanordnung nicht tiefer in die Haut eindringen soll. Beispielsweise wurde beim aktuellen Modell HAWK™ thunder® der Firma MT.DERM ein vergrößerter Hub von 4 mm gegenüber 2,5 mm beim Vorgängermodell realisiert, was einer Steigerung des Hubs von etwa 60 Prozent entspricht. Insbesondere beim Kurbeltrieb kann sich eine Hubvergrößerung positiv auf die Laufruhe auswirken, da das notwendige Ausgleichsgewicht das meist geringe Trägheitsmoment des Rotors des DC-Motors steigert und damit Regelschwankungen in der Elektronik kompensiert und mechanische Lastspitzen besser abgefangen werden.

Ein triviales Konzept zur Steigerung der Stechgeschwindigkeit ist die Erhöhung der Arbeitsfrequenz, welche sich bei Tätowiermaschinen bis zu einer begrenzten Arbeitsfrequenz praktisch durchgesetzt hat. Möglich wäre eine weitere Erhöhung der Stechgeschwindigkeit durch eine Anhebung der elektrischen Betriebsspannung sowie durch die Zwischenschaltung eines entsprechenden Getriebes. Für das maschinelle kosmetische Pigmentieren von Haut (Tattoo, PMU) ist ein komplexes Zusammenspiel zwischen der horizontalen Arbeitsgeschwindigkeit auf der Haut, dem Stechwinkel zur Hautoberfläche und der Arbeitsfrequenz des Stechgeräts notwendig. Dafür bedarf es neben gewissen künstlerischen Fähigkeiten teils jahrelanger Erfahrung bei der horizontalen und vertikalen Handführung. Es existiert ein Zusammenhang zwischen der Stechfrequenz der Maschine und der Stechgeschwindigkeit der Nadel bzw. der Geschwindigkeit der über der Hautoberfläche geführten Stechgerätmündung.

Um die gleiche Stechkanaldichte in der Haut zu erhalten, muss bei doppelter Stechfrequenz die Geschwindigkeit der Zeichenbewegung des Künstlers ebenfalls verdoppelt werden, was jedoch nicht praktikabel ist, da für die sichere und vor allem gezielte Führung der farbeintragenden Gerätespitze viel Erfahrung notwendig ist. Da die Maschinen auf die bisher üblichen Arbeitsfrequenzen optimiert wurden, würde eine deutlich höhere Arbeitsfrequenz einerseits verstärkte Vibrationen und vorzeitigen Verschleiß der Maschine, andererseits bei gleichem Hub und höherer Frequenz auch eine deutliche Steigerung des durch innere Reibung im Elastomermaterial der Tätowiermodule verursachten Wärmeverlusts bedeuten, was zu vorzeitigem Bauteilversagen und damit zu einer Kontaminationsgefahr führt.

Daher wurden neue Antriebskonzepte entwickelt, um eine Änderung der Stechgeschwindigkeit möglichst unabhängig von der Stechfrequenz konstruktiv zu realisieren. Einige dieser Aktorkonzepte wurden als Funktionsmodell aufgebaut und untersucht.

Um den Einfluss der Stechgeschwindigkeit sowie die Interaktion zwischen der eindringenden Nadel und der Haut zu untersuchen, wurden zahlreiche Experimente durchgeführt und ausgewertet.

4.1.1 Versuche zum Einfluss der Stechgeschwindigkeit

Einen Versuchsaufbau zum Stechen in Schweinehaut zeigt die Abbildung 4-1. Auf dem Rand eines einseitig offenen Zylinders wurde Schweinehaut vollflächig befestigt und mittels eines innen liegenden ringförmigen Kolbens trommelfellartig gespannt. Als Linearantrieb für die Kanüle diente ein Pneumatikzylinder der Firma FESTO, der laut Hersteller eine Ausfahrge-
schwindigkeit von bis zu 7 m / s aufweist. Als Messeinrichtung wurde ein hoch auflösender Laser-Triangulationssensor der Firma μ Epsilon verwendet, wobei die Strahlebene über einen Umlenkspiegel gefaltet wurde, um die Messung der Hautposition in unmittelbarer Nähe zur Einstechstelle zu ermöglichen. Bei diesem Versuchsaufbau wurde der Einfluss der Stechgeschwindigkeit und der Vorspannung der Haut auf das maximale Ausweichen der Hautoberfläche untersucht, weshalb keine Erfassung der Nadelposition über der Zeit erfolgte [Scho09].

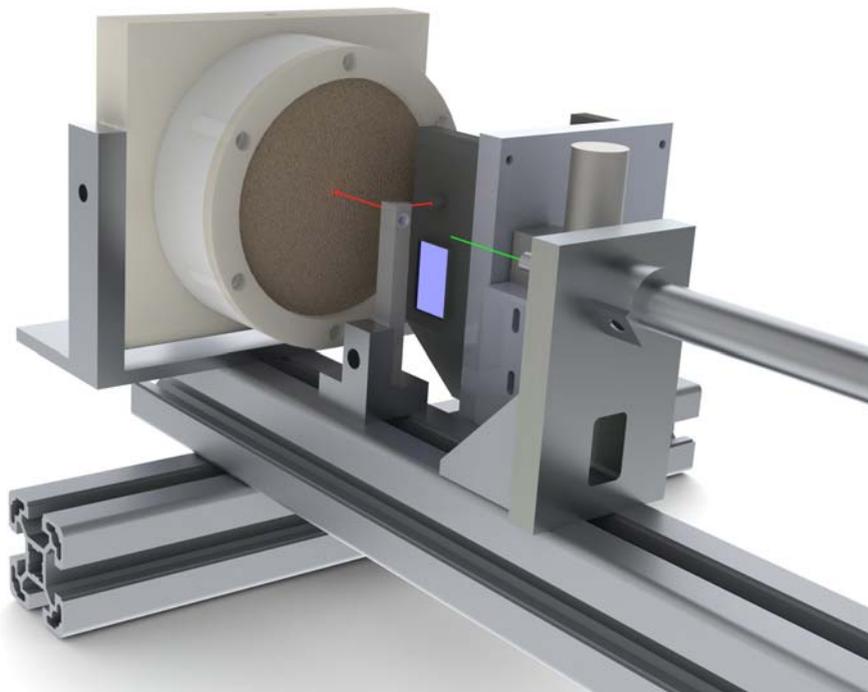


Abb. 4-1 Versuchsanordnung zur Messung des Hautausweichens an Modellhaut mit einem Pneumatikzylinder als Antriebseinheit, CAD-Bild: A. Loth

Dabei ließ sich kein sicherer Zusammenhang zwischen der Stechgeschwindigkeit und dem Hautausweichen nachweisen. Einerseits kam es zu einem schnellen Verschleiß des ungeeignet belasteten Pneumatikzylinders und damit zu einer unzuverlässigen Linearführung. Andererseits konnte das Hautverhalten aufgrund der fehlenden zeitlichen Zuordnung der Nadelposition nicht zuverlässig bewertet werden. Die extremale Hautposition war eine schlecht gewählte und stark streuungsbehaftete Beobachtungsgröße.

Zusätzlich zeigten Kanülen praxisüblicher Außendurchmesser bei Stechversuchen an freiwilligen Probanden im Highspeed-Video ein weit geringeres Ausweichen der stechstellennahen Hautbereiche, als es bei den Modellversuchen beobachtet wurde, sodass der oben beschriebene Versuchsaufbau einem Redesign unterzogen wurde. Einerseits wurde das Stechgerät als mobiles Handgerät neu gestaltet, andererseits wurde die Messeinrichtung überarbeitet und den

neuen Anforderungen angepasst. Videoaufnahmen mit einer Highspeed-Kamera von Stechversuchen sind gerade für kleine Positionsänderungen von Haut und Nadelspitze wegen der begrenzten optischen Auflösung und perspektivischer Verzerrungen nur bedingt zuverlässig auszuwerten. Daher wurde die Entwicklung eines dafür spezialisierten Geräts angestrebt. Dieses sollte eine Erfassung der Position von Nadelspitze und Hautoberfläche in unmittelbarer Nähe zur Einstechstelle zu jedem Zeitpunkt des Stechvorgangs ermöglichen, sodass über der Zeit nicht nur die Absolutbewegungen beider, sondern auch die Relativbewegungen zueinander erfasst und ausgewertet werden können. Damit wird eine systematische Erfassung des Hautausweichens realisiert.

Das Stechgerät sollte nach dem Redesign vor allem für Stechversuche an freiwilligen Probanden geeignet sein und daher sowohl bezüglich der Messstelle am Individuum als auch bezüglich der lokalen Örtlichkeit mobil sein. Es sollte eine einfache Einstellmöglichkeit für verschiedene Stechgeschwindigkeiten aufweisen, um ein von der Stechgeschwindigkeit abhängiges Hautverhalten beobachten zu können. Daher wurde ein pistolenartiges handgeführtes Einzelstechgerät auf der Basis eines Feder-Energiespeichers aufgebaut. Wegen der zu erwartenden relativ geringen Anzahl an Messversuchen wurde ein einfacher konstruktiver Aufbau bevorzugt. Für den Stechvorgang wird zuvor die Spiralfeder nach der Art eines Vorderladers gespannt und durch einen Abzug ausgelöst, sodass ein geführter Schlitten nach vorn schießt. Die Stechgeschwindigkeit lässt sich durch die Wahl der Feder und deren Vorspannung verändern.

Über eine analoge Wegmesseinrichtung in Form eines Linearpotentiometers und eine zeitlich hoch auflösende Abtastrate lässt sich zu jedem Zeitpunkt die Position der Nadel bestimmen. Bei Stechversuchen ließen sich damit Stechgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s nachweisen. Wegen der auftretenden hohen mechanischen Belastungen am geführten Schlitten wurde in diesem Bereich der Gerätegestaltung wiederholt ein Redesign vorgenommen. Die Abbildung 4-2 zeigt das Handgerät, jedoch ohne die entwickelte und unten näher beschriebene Messeinrichtung für die Hautposition. Gut zu erkennen ist das oben liegende Linearpotentiometer zur Lageerfassung der Nadelposition während des Stechvorgangs.

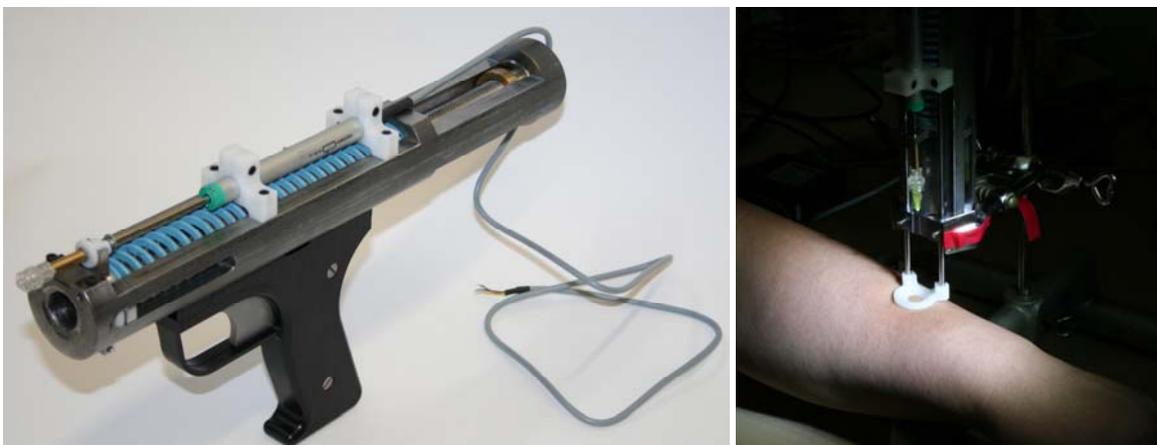


Abb. 4-2 Mobiles Stechgerät(links, Hautauflagefläche demontiert) und Versuchsaufbau (rechts)

Zeitgleich zum beschriebenen Federaktor wurde ein Stechaktor mit Spindeltrieb entwickelt, siehe Abbildung 4-3. Dieser weist nur geringe Stechgeschwindigkeiten auf, wodurch Messungen im quasistatischen, wie auch im Bereich geringer Geschwindigkeiten durchgeführt werden können, was die Palette der mit den experimentellen Stechaktoren darstellbaren Geschwindigkeiten um den Bereich der niedrigen Geschwindigkeiten ergänzt. Für den in der Abbildung 4-3 gezeigten Versuchsstand wurden wesentliche Teile des in der Abbildung 4-1 gezeigten Aufbaus wieder verwendet.

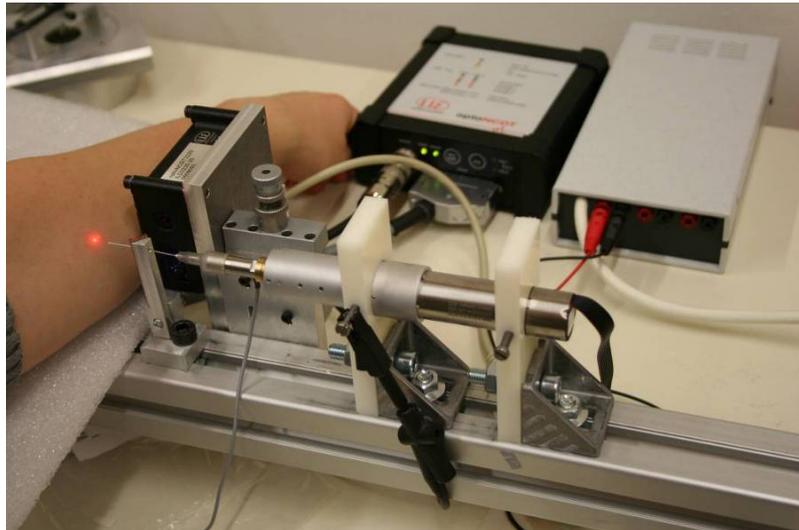


Abb. 4-3 Versuchsaufbau zur Messung des Hautausweichens unter Verwendung des Spindelaktors

Stechversuche mit dem Spindelaktor ergaben bei steigender Stechgeschwindigkeit eine abnehmende Hautdellung für den Moment des Nadeleindringens in die Haut, siehe die Abbildung 4-4. Dabei wurde jeweils die relative Hautverschiebung unmittelbar vor dem Übergang vom reinen Ausweichen der Haut zum scharfen Eindringen der Nadel in die Haut in die Wertetabelle für das Diagramm übernommen. Dieser Übergang war anhand einer sprunghaften Abstandsänderung gut erkennbar.

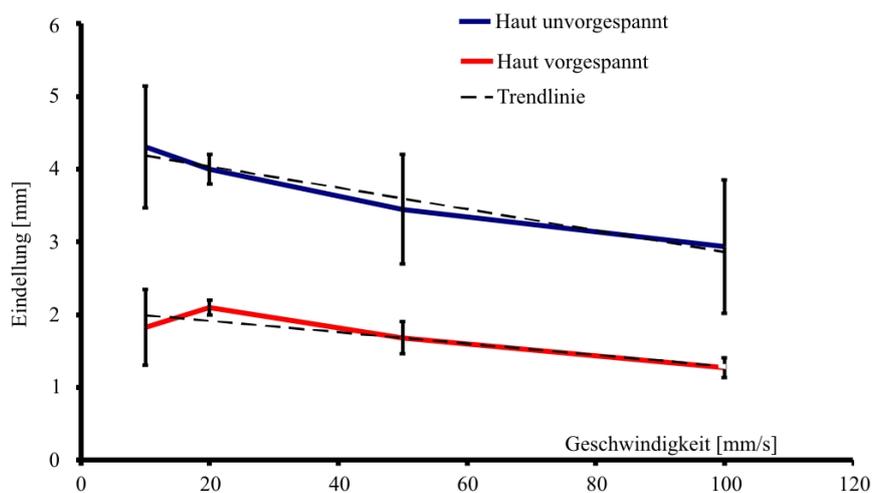


Abb. 4-4 Messergebnisse bei geringer Einstechgeschwindigkeit mit und ohne Vorspannung

Wegen des hyperbolischen Kurvenverlaufs und der wenigen Stützstellen ließ sich keine zuverlässige Mindeststechgeschwindigkeit extrapolieren. Dennoch unterstützt die abnehmende Tendenz die Annahme der Existenz einer Mindeststechgeschwindigkeit. Zudem ist gut der Einfluss der Hautvorspannung zu erkennen.

Anschließend wurden Messungen mit dem oben beschriebenen mobilen Einzelstechgerät (Federaktor) durchgeführt und mit der Highspeed-Videokamera dokumentiert und bewertet.

Die dabei vorgewählten Geschwindigkeiten führten einerseits zu erheblichem Materialverschleiß am Gerät, weshalb ein mehrfach notwendiges, iteratives Redesign die Versuche stark verzögerte. Andererseits war es kaum möglich, aussagekräftige Einzelbildaufnahmen mit der Highspeed-Kamera vom Stechvorgang zu erhalten, wie die Abbildung 4-5 veranschaulicht. Die Bildfrequenz, also die Anzahl der je Zeit aufgenommenen Bilder, hängt beim verwendeten Kameramodell umgekehrt proportional von der vertikalen Größe des Bildausschnitts ab. Je schmaler der „Bildstreifen“ in der Höhe ist, desto höhere Bildfrequenzen lassen sich aufzeichnen. Die horizontale Bildbreite hat wegen des begrenzten internen Speichers Einfluss auf die maximal mögliche Dauer der Videosequenz. In der Abbildung 4-5 sind fünf direkt aufeinander folgende Videobilder eines Stechvorgangs mit einer Kanüle, Durchmesser 0,3 mm, Länge 12 mm (30 G x 1/2“), bei einer Bildfrequenz von 2.877 Hz wiedergegeben. Dabei wurde die Nadel rot umrandet. Eine Kratzspur auf der Haut wurde von der durch den Anprall zurückgeworfenen Nadelspitze verursacht sowie durch ein Spiel in der Nadelführung ermöglicht und grün gekennzeichnet.

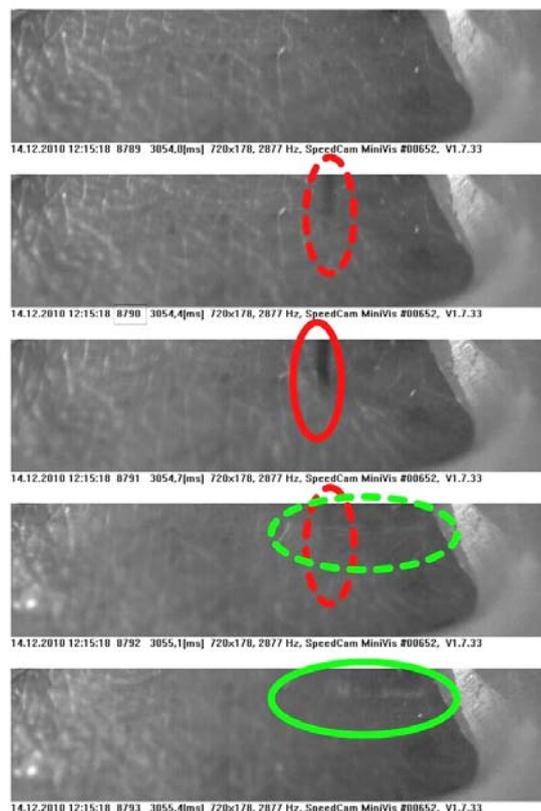


Abb. 4-5 Bildsequenz vom Stechvorgang mit dem mobilen Stechgerät, rechts im Bild ein Ausschnitt der Hautauflage

Unterbrochene Linien identifizieren einen nicht abgeschlossenen Vorgang während der Einzelbildaufnahme, man beachte den laufenden Zeitzähler [ms] der Einzelbilder. Bei der in diesem Versuch verwendeten Stechgeschwindigkeit von etwa 9,5 m / s kann anhand der gezeigten Highspeed-Videobilder kein nennenswertes Hautdellen beobachtet werden. Dabei lässt sich wegen der begrenzten zeitlichen und optischen Auflösung der Kamera nicht feststellen, ob die Mindeststechgeschwindigkeit erreicht bzw. überschritten wurde und tatsächlich kein Hautausweichen auftritt oder das Messverfahren versagt.

Um die Hautoberfläche während des Stechvorgangs zeitlich hoch aufgelöst beobachten und auch kleinste Positionsänderungen der Hautoberfläche messen zu können, wurde ein Triangulationssensor entwickelt, der vier direkt nebeneinander angeordnete Sensorparallelebenen aufweist, wodurch sich der Abstand von vier Punkten auf der Hautoberfläche mit festem seitlichem Abstand über der Zeit ermitteln lässt. Daraus kann bei bekanntem Abstand zwischen den Messpunkten und zur Nadel die Hautposition in unmittelbarer Nähe zum eindringenden Nadelschaft extrapoliert werden.

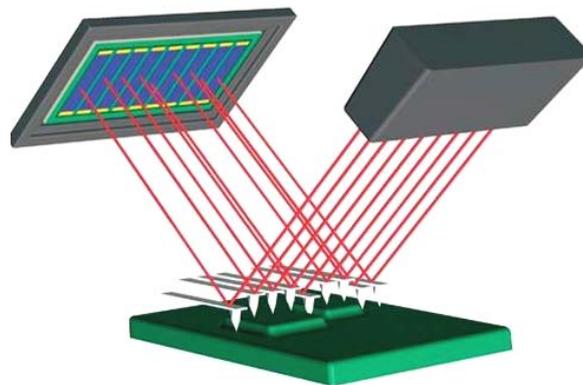


Abb. 4-6 Veranschaulichung des Lichtschnittverfahrens, z.B. zum Auslesen von Tasthebelpositionen, rechts die Lichtquelle, links ein PSD-Array [LaCo11]

Die Abbildung 4-6 verdeutlicht das Prinzip des angewandten Lichtschnittverfahrens, wobei hier die spiegelnde Reflexion des Messlichts dargestellt ist. Herzstück des 4-fach Triangulationssensors ist ein PSD-Array, wobei die Funktion einer einzelnen „positionssensitiven Diode“ (PSD) zur Bestimmung der Position des auftreffenden Lichtstrahlenbündels anhand der Abbildung 4-7 dargestellt wird.

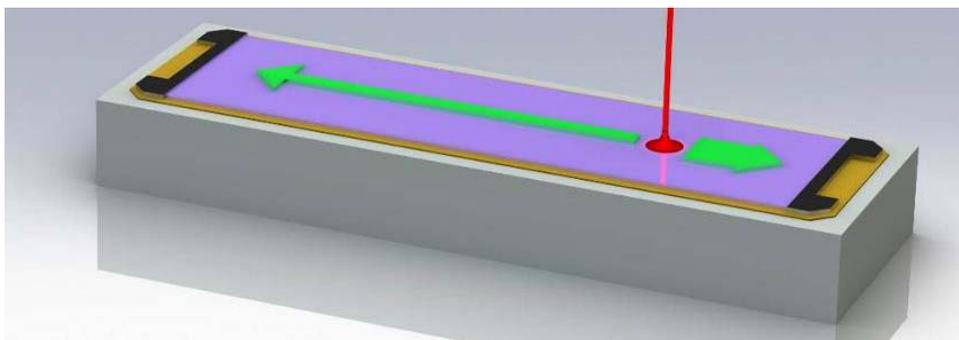


Abb. 4-7 CAD-Modell eines einzelnen PSD-Sensors mit auftreffendem Lichtstrahl (rot) und positionsabhängig aufgeteiltem Fotostrom (grün), der zu den Elektroden (schwarz) abfließt

Es handelt sich bei einer PSD um eine flächig-gestreckte Fotodiode mit zwei Ausgangselektroden und einer Bezugsmasse. Der durch das auftreffende Licht entstehende Fotostrom teilt sich entsprechend der Lichtfleckposition auf der PSD-Sensorfläche und wegen der unterschiedlich weit entfernten Elektroden und dem damit unterschiedlich entgegen wirkenden elektrischen Widerstand der Halbleiterschicht nach dem Prinzip des abgewandten Hebels auf und fließt über die beschalteten Elektroden ab.

Der Ausgangsstrom je PSD-Elektrode ist mit maximal $15 \mu\text{A}$ derart gering, dass es sinnvoll ist, eine Umcodierung von Strom in Spannung als Informationsträger in unmittelbarer Sensornähe vorzunehmen. Dafür wurden Operationsverstärker in einer so genannten Transimpedanzschaltung verwendet, die gleichzeitig das Signal verstärken. Der Vorteil eines Spannungssignals ist, dass es bei hochohmiger Last praktisch nicht mehr von der Leiterlänge abhängig ist.

Es wurde eine Platine gestaltet, die auf der einen Seite den PSD-Array-Chip und auf der anderen, gewissermaßen rucksackartig, die Wandlerelektronik trägt. Die Platine und die entsprechenden topografischen Beziehungen zu den angrenzenden Bauteilen zeigt Abbildung 4-9.

Bei dem verwendeten Licht muss es sich nicht zwingend um Laserlicht handeln, auch bei einem auf der Sensorfläche erzeugten optischen Bild eines Lichtpunkts auf der zu messenden Oberfläche lässt sich die Position genau bestimmen. Wegen der maximalen Empfindlichkeit der PSD im Infrarotbereich wurde als Lichtquelle ein lang gestreckter Temperaturstrahler (Glühlampe mit geradem Glühfaden) verwendet, siehe weiter unten.

Die Position wird über den Quotienten aus der Differenz und der Summe beider Fototeilströme berechnet, wodurch die Lagebestimmung unabhängig von der einfallenden Lichtintensität ist. Damit wird die Sensormitte zur Bezugslage, das Vorzeichen des Quotienten bestimmt die Richtung der Lichtfleckverschiebung von der Mitte der Sensorfläche, der Betrag des Quotienten eine auf die zu jeder Seite zur Verfügung stehende halbe Sensorlänge bezogene Größe.

Der zur Messung eingesetzte PSD-Array-Sensor mit vier positionssensitiven Diodenstreifen wurde von der Berliner Firma Silicon Sensors eigens für die Versuche hergestellt und ist in der Abbildung 4-8 im Größenvergleich mit einer Ein-Cent-Münze dargestellt, während in der Abbildung 4-9 das geöffnete Sensorgehäuse erkennbar ist.

Als Lichtquelle wurde ein Temperaturstrahler in Form einer Niederspannungs-Glühlampe mit gestrecktem Glühfaden eingesetzt. Dadurch wird ein hoher Spektralanteil im Bereich der maximalen Empfindlichkeit des PSD-Array-Sensors erhalten. Gleichzeitig wird ein sichtbarer Anteil emittiert, der zur Einstellung der Fokussierung und der Beobachtung dient und ebenfalls einen gewissen Beitrag zum Sensorsignal leistet. Die zu erwartende Abbildungsunschärfe des Glühfadens auf der Hautoberfläche durch den Effekt der chromatischen Aberration der für die Abbildung eingesetzten bikonvexen Linse kann wegen der Lichtfleckschwerpunkt-bildenden Eigenschaft des PSD-Funktionsprinzips vernachlässigt werden.

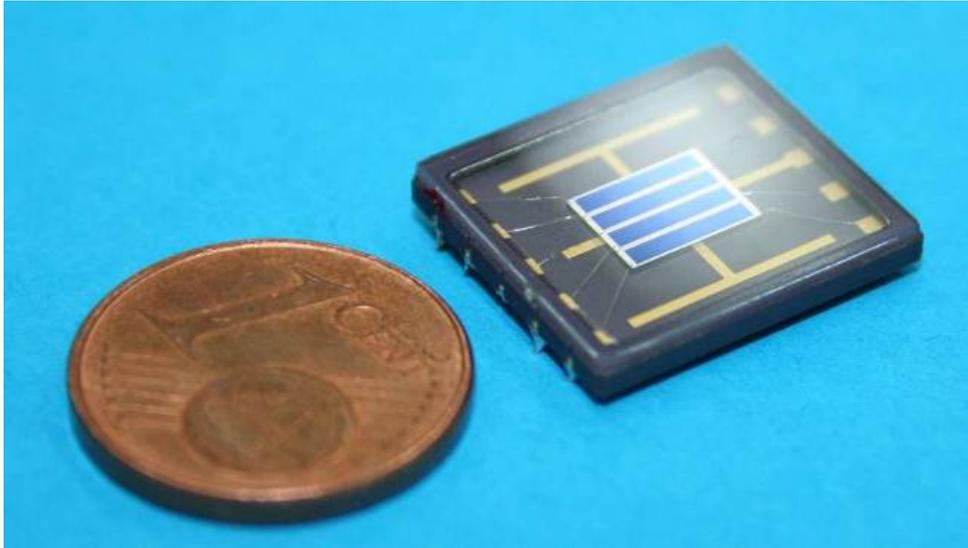


Abb. 4-8 Bild eines PSD-Array-Chips im Größenvergleich



Abb. 4-9 Blick in das geöffnete Sensorgehäuse auf den PSD-Array-Chip

Die Abbildung 4-10 zeigt den vorderen Ausschnitt des einsatzbereiten Einzelstechgeräts als Versuchsaufbau. Gut zu erkennen sind der PSD-Array-Sensor mit geschlossenem Gehäuse (im Bild vorne links) sowie eine flächige Elektrode aus Kupferfolie auf der Unterseite der Hautauflagefläche. Diese war zusammen mit der Kanüle über flexible Leiter an eine Hautkontaktschaltung angeschlossen, die ein Triggersignal erzeugte, sobald die Nadel die Hautoberfläche berührte, wodurch die zeitliche Zuordnung der Messsignale vom PSD-Sensor und vom Linearpotentiometer erfolgte, die mittels einer zeitlich hoch auflösenden 10-Kanal-Parallel-USB-LabVIEW-Messkarte mit gleicher Taktung erfasst wurden.

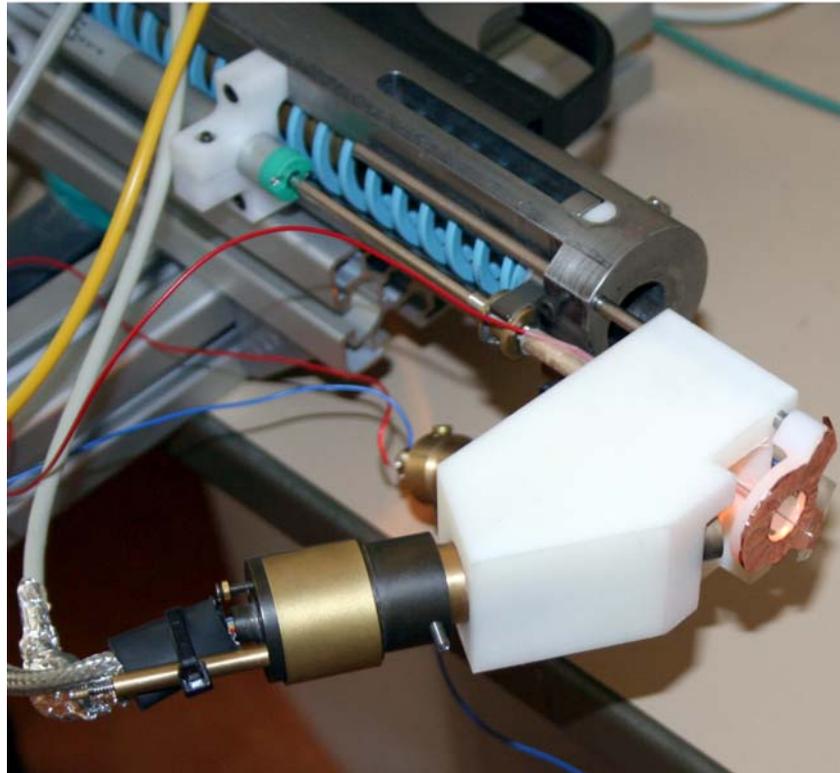


Abb. 4-10 Messaufbau mit PSD-Array-Triangulationssensor in einer speziellen Halterung (weißes Gehäuse) und mit flächiger Hautkontakt-Elektrode

Der Einsatz des aufgebauten Vierfach-PSD-Array-Sensors zum Erfassen des Hautausweichens erwies sich als wenig zuverlässig, da ein in vernünftigem zeitlichen Rahmen nicht beherrschbares Messrauschen auftrat, welches lediglich durch aufwendige Strategien bezüglich des Platinenlayouts, der Bauelemente-Auswahl sowie bei der Gestaltung der Signalwege mit fraglichem Erfolg angegangen werden kann.

Insgesamt wurde deutlich, dass das Konzept des Vermeidens des Hautausweichens allein durch die aktorseitige starke Erhöhung der Einstechgeschwindigkeit nicht wirtschaftlich umsetzbar ist. Besonders für eine geringe Stechtiefe nimmt der Aufwand überproportional zu. Beim Auftreffen der Nadelspitze soll die Relativgeschwindigkeit zwischen Haut und Nadel möglichst hoch und beim Erreichen der geforderten Stechtiefe - praktisch unmittelbar danach - gleich Null sein. Solche extremen negativen Verzögerungen können nur durch ein Anprallverhalten realisiert werden, was, auf der Stechaktorseite realisiert, zu großen und kaum beherrschbaren Materialbelastungen und Betriebsgeräuschen führt. Daher wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem das Anprallen statt zwischen Teilen des Stechgeräts zwischen dem entsprechend gestalteten Stechwerkzeug und der Haut auftritt, siehe Kapitel 4.5.

Andererseits lässt sich aus dem im Einleitungsteil des Kapitels 4.1 Gesagten ableiten, dass vor allem im Bereich der maschinellen Stechgeräte eine höhere Stechgeschwindigkeit bei gleich bleibender Stechfrequenz vom Markt gefordert wird, um flüssige Wirkstoffe, insbesondere Farben beim kosmetischen Pigmentieren, besser in die Haut eintragen zu können. Daher wurden neben anderen Ansätzen Stechgeräte entwickelt, die sich vom Stand der Technik abheben und die genannte Forderung umsetzen.

4.1.2 Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 1: Kurbeltrieb mit vergrößertem Hub

Im Bereich der kosmetischen Pigmentierung gewinnen die auf dem Prinzip des Kurbeltriebs basierenden Stechgeräte zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die kompakte Bauweise und die Forderung nach einem geschlossenen Gehäuse zur hygienischen Reinigung sind wichtige Voraussetzungen für diesen Erfolg.

Aktuelle Rotary-Maschinen weisen einen Nadelhub von etwa 4 mm auf, womit eine Grenze beim Nadelhub erreicht zu sein scheint. Man beachte hierzu die Ausführungen im Kapitel 2.3, insbesondere bezüglich des Kurbeltrieb-Aktors und der Darstellung der Geschwindigkeits-Weg-Funktion für einen variablen Hub in der Abbildung 2-22.

Bei den Rotary-Maschinen existieren zwei wesentliche Konstruktionsprinzipien, um den Achsenversatz bzw. die Exzentrizität zweier zylindrischer Bauteile zu erhalten. Beim ersten wird auf der Motorwelle eine meist zylindrische Scheibe mit zentrischer Bohrung angebracht, die zusätzlich einen mit bestimmtem Abstand zur Drehachse parallel dazu abstrebenden Kurbelzapfen trägt, auf dem die Drehbewegung zum Nadelstößel entkoppelnde Kugellager befestigt ist und die Hubbewegung auf den Nadelkolben überträgt. Beim zweiten Prinzip wird auf der Motorwelle eine zylindrische Scheibe mit einer um einen bestimmten Abstand versetzten exzentrischen Bohrung angebracht. Auf dem Umfang der Scheibe, die selbst als Kurbelzapfen dient, wird das entkoppelnde Lager befestigt. Auf dessen Außenring wird der Pleuel befestigt, welcher die Hubbewegung auf den Nadelkolben überträgt.

Da die mitbewegte Masse des Nadelkolbens beim erstgenannten Prinzip hoch ist, muss ein bestimmter Minstdurchmesser des Kurbelzapfens für die Gewährleistung der Dauerfestigkeit vorhanden sein. Gleichzeitig wirken auf das zwischengeschaltete entkoppelnde Lager hohe Belastungen, weshalb dieses ebenfalls eine gewisse Baugröße aufweist. Die hohen bewegten Massen bewirken zudem schlecht kompensierbare Vibrationen bei solchen Stechgeräten. Beim zweiten Prinzip führt eine Vergrößerung des Hubs bauartbedingt ebenfalls zu einer weiteren Zunahme des davon abhängigen Innen- und Außendurchmesser des Lagers und des Pleuels und damit der exzentrisch umlaufenden Masse, die sich jedoch durch eine beidseitig der Ebene bzw. der Kurbelanordnung und um 180° auf der Motorwelle versetzt angeordnete Ausgleichsmasse kompensieren lässt.

Daher tritt bei beiden Varianten eine Begrenzung auf, den vorhandenen Hub weiter zu vergrößern. Es wurde eine Aufbau entwickelt, bei dem die beschriebenen Probleme durch eine Umkehr des Kraftflusses bezüglich der Antriebsachse behoben werden: statt des Prinzips „von innen nach außen“, wie beschrieben, wurde das Prinzip „von außen nach innen“ verfolgt. Dabei wird bei einer zentrisch auf der Motorwelle angebrachten Scheibe ein vergleichsweise kleines Lager in einer exzentrischen Bohrung angebracht. Der Pleuel weist einen seitlich abstrebenden Zapfen auf, bevorzugt ein rechtwinklig gebogenes Ende, der im inneren Lagerring liegt. Dadurch wird die mitbewegte Masse deutlich reduziert. Weist das Material für die Kurbelscheibe eine ähnliche Dichte wie das Kugellager als Gesamtbauteil auf, ergibt sich eine zu vernachlässigende Unwucht, siehe die Abbildung 4-11.

Es wurden mehrere Testgeräte auf der Basis einer Kurbelscheibe mit innen liegendem Kugellager und reduziertem Pleuel aufgebaut und untersucht. Hierzu wurden Gehäuseteile der Cheyenne™ HAWK thunder®-Modellsreihe verwendet.



Abb. 4-11 Vibrationsarmer Kurbeltrieb mit 4,6 mm Hub und reduzierter Pleuelmasse, Variante mit einem Kugellager, oben Prototyp, unten Detailansicht der Kurbel-Pleuel-Baugruppe

Die Testgeräte wurden mit 100 Hz betrieben und wiesen einen Hub von 4,6 mm auf, was einer Steigerung des Hubs um 15 Prozent gegenüber dem aktuell am Markt erfolgreichen Modell Cheyenne HAWK™ thunder® der Firma MT.DERM entspricht. Als Belastung wurden Standardmodule mit hoher Steifigkeit der Rückstellfeder bei maximaler Vorspannung (Einstellung des maximalen Nadelherausstands) verwendet. Zusätzlich wurden iterativ verschiedene Lagerprinzipien, -größen und -anordnungen untersucht: a) eine Kurbelscheibe aus kohlenstoffhaltigem Gleitlagermaterial, b) eine Anordnung zweier Miniaturlager $\varnothing 1 \times \varnothing 3 \times 1$ mm mit Abstandshülse sowie c) ein einzelnes Miniaturlager $\varnothing 1,5 \times \varnothing 5 \times 2,6$ mm. Darüber hinaus wurden beispielsweise folgende Anordnungen vorgeschlagen, jedoch nicht aufgebaut und untersucht: eine aus Sinterbronze oder Keramik in der Endform hergestellte Kurbelscheibe - optional schmierstoffgetränkt, eine aus Sinterbronze-Halbzeug gefertigte Kurbelscheibe sowie Einsatzbuchsen aus Gleitlagermaterial oder Sinterbronze für eine Kurbelscheibe aus solidem Metall ohne besondere Anforderungen an dessen Eigenschaften.

Aufgrund des geringen Pleuelstabdurchmessers von 1 mm ergibt sich für eine Arbeitsfrequenz von 150 Hz in der Gleitfuge eine Relativgeschwindigkeit der Reibpartner von 0,2 m / s, die für die meisten Gleitlagermaterialien grenzwertig tolerabel ist.

Die Variante a) wies nach 48 Stunden einen sehr frühen Verschleiß auf. Dafür wird eine eingeschränkte Reibwärmeabfuhr aufgrund des soliden Kunststoffkörpers ursächlich gesehen. Eine massive metallische Kurbelscheibe und eine dünnwandige Gleitlager-Einsatzbuchse aus Kunststoff verringern diesen Effekt.

Beim Testgerät nach Variante b) versagte das pleuelnahe Lager innerhalb einer Versuchszeit von 200 Stunden. Dies machte bei der überarbeiteten Variante c) die Vergrößerung dieses Lagers notwendig.

Der verwendete Pleuelstab besitzt einen Durchmesser von 1 mm, das zu dem in b) verwendeten nächst größere Lager einen Innendurchmesser von 1,5 mm. Daher wurde eine Ausgleichshülse verwendet, die auf den Pleuelstab geschoben und mit diesem zusammen bei möglichst kleinem Radius um 90° gebogen wurde, wodurch für eine einfache Montage die Notwendigkeit einer zusätzlichen Fixierung der Hülse auf dem Pleuelstab entfällt. Zusätzlich erhält die gebogene Form durch die Hülse mehr Steifigkeit.

Um auf eine Abstützung mit einem zweiten Lager (wie zuvor) verzichten zu können, wurde bei der Wahl eines größeren Lagers eine Zwischengröße ($\varnothing 1,5 \times \varnothing 4 \times 1,2$ mm) übersprungen und stattdessen ein Lager größerer Bauhöhe ($\varnothing 1,5 \times \varnothing 5 \times 2$ mm) und mit höherer Tragzahl verwendet.

Wegen der Durchmesserzunahme durch die zusätzliche Hülse und deren begrenzter Wandstärke musste der zuvor verwendete Biegeradius des 90°-Bogens entscheidend erhöht werden, wodurch der Abstand zwischen der Pleuel-Bewegungsebene und der mittleren Lager-Radialebene stieg, da das Lager erst auf einem Abschnitt außerhalb des Bogens angebracht werden kann. Dieser Abstand führt dazu, dass neben der radialen Belastung auch eine Momentenbelastung um eine Lagerquerachse auf das Lager wirkt, was zu einem vorzeitigen Verschleiß und bei einem von zwei Prototypen zu einer Lagerzerstörung nach etwa 250 Betriebsstunden führte.



Abb. 4-12 Innenraum eines Prototyps mit totalem Lagerschaden nach 250 Stunden Volllast-Betrieb

Um die Belastung des Lagers möglichst auf eine radiale Kraftkomponente zu reduzieren, wurde statt des einfachen 90°-Bogens ein Doppel-S-Bogen entwickelt, siehe Abbildung 4-13.

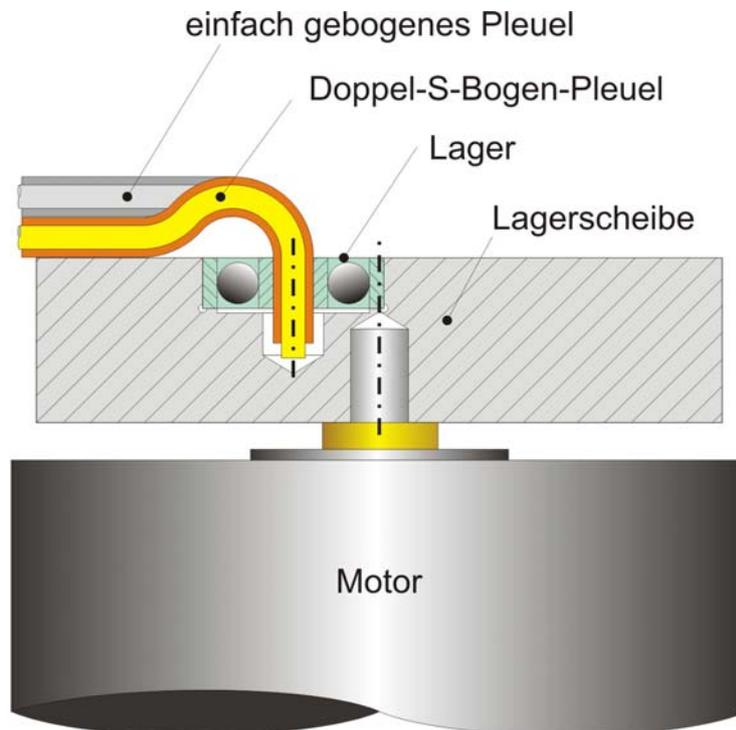


Abb. 4-13 Ein Doppel-S-Bogen (gelb-orange) statt eines einfachen 90°-Bogens (grau) beim Pleuelknie verringert die ungünstige Lagerlast erheblich, schematische Darstellung

Ein Prototyp mit dieser konstruktiven Änderung wird aktuell aufgebaut und untersucht, praktische Ergebnisse liegen bisher noch nicht vor.

Es konnte anhand der getesteten Prototypen gezeigt werden, dass sich mittels des vorgeschlagenen Konzepts der Hub und damit die Nadelauftrittsgeschwindigkeit gegenüber einem klassischen Kurbeltrieb mit verringertem Bauteil- und Montageaufwand sowie Platzbedarf vibrationsarm deutlich vergrößern lassen.

4.1.3 Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 2: Stabkurbeltrieb

Als eine Möglichkeit für die Erzeugung eines großen Hubs bei einer achsenparallelen Anordnung von Motor- und Stechachse wurde das Konzept des Stabkurbeltriebs entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen Kurbeltrieb, bei dem das untere Pleuelauge in einer Querebene zum Abtriebskolben rotiert. Hierfür muss eine dreidimensionale Schwenkbewegung des Pleuels durch entsprechende gelenkige Verbindungen sowie eine Drehentkopplung innerhalb des Pleuels realisiert werden.

Bei einem Labormuster wurde der Pleuel durch eine lang gestreckte, rohrförmige Hülse gebildet, in die beidseits die Zapfen eines Kugelgelenkkopfes der halben Länge der Hülse ragen. Beide Zapfen werden im Innern der Hülse durch eine gehärtete Kugel beabstandet. Durch diese Maßnahme sowie durch das Schmierstoff-unterstützte Gleiten der Zapfenmantelflächen an der lang gestreckten Hülseinnenwand lässt sich die Drehentkopplung realisieren.

Antriebsseitig wurde auf einer Motorwelle eine Scheibe aus mit Kohlenstoff angereichertem Gleitlagerkunststoff auf PEEK-Basis mit mehreren Kugelenkpfannen angebracht. In einer davon befindet sich der proximale Kugelkopf des Pleuelstabs. Der distale Kugelkopf des Pleuelstabs läuft in einer weiteren Kugelpfanne, die vom axial beweglichen, jedoch drehfest und federnd gelagerten Abtriebsstößel gebildet wird. Die Abbildung 4-14 zeigt das Labormuster und im unteren Bild Details der Mechanik des Stabkurbeltriebs.

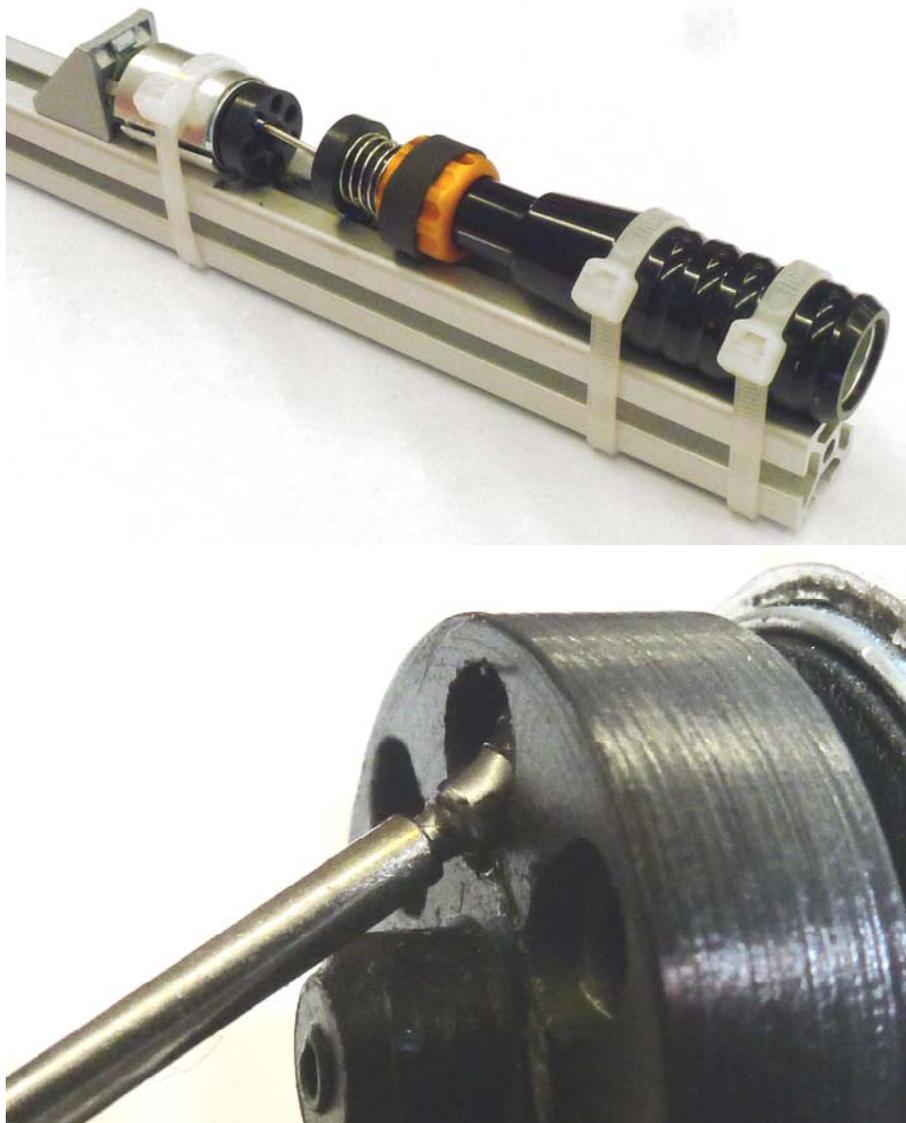


Abb. 4-14 Stabkurbeltrieb-Labormuster, oben in einer Übersicht, unten Detail der Antriebskurbelscheibe und des Pleuelstabs

Die kinematischen Verhältnisse werden wesentlich durch den radialen Abstand beider Kugelpfannen von der Motorlängsachse sowie den Abstand der Kugelkopfmittelpunkte des Pleuelstabs zueinander bestimmt.

Man betrachte Abbildung 4-15: Die Hubeinstellung lässt sich bei diesem Konzept besonders einfach durch die Veränderung des radialen Abstands der abtriebseitigen Kugelpfanne K_2 zur Motorlängsachse z realisieren, was auch eine Änderung während des laufenden Betriebs ermöglicht. Vorzugsweise erfolgt diese Änderung durch eine Drehbewegung am Abtriebsstößel

um eine gedachte Drehachse, in der Abbildung 4-15 links durch die Veränderung des Winkels β dargestellt. Durch die Drehbewegung lässt sich gleichzeitig eine (nicht dargestellte) Ausgleichsmechanik betätigen, um die Einstellung des maximalen Nadelherausstands von der Hubeinstellung zu entkoppeln, beispielsweise in Form einer Drehkulisse oder eines Spezialgewindes.

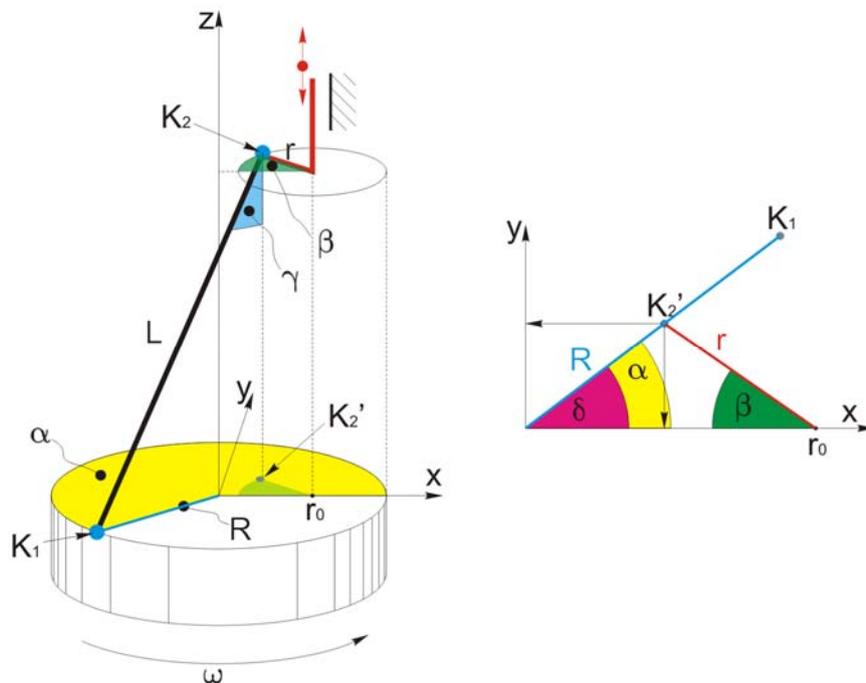


Abb. 4-15 Schematische Verhältnisse beim Stabkurbeltrieb, rechts Blick auf die x-y-Ebene für den besonderen Fall des maximalen Nadelherausstands

In der Abbildung 4-15 erkennt man zudem, dass die z-Komponente des Punkts K_2 die Kathete eines rechtwinkligen Dreiecks $K_1K_2'K_2$ bildet, wobei die Länge der Hypotenuse L bekannt ist. Die zweite Kathete ist der geometrische Abstand zwischen den Punkten K_1 und K_2' in der x-y-Ebene, der sich aus der x- sowie y-Koordinatendifferenz der beiden Punkte K_1 und K_2' mit dem Satz des Pythagoras ermitteln lässt.

$$x_{K_1} = R \cdot \cos(\alpha) \quad (4-1)$$

$$y_{K_1} = R \cdot \sin(\alpha) \quad (4-2)$$

$$x_{K_2'} = r_0 - r \cdot \cos(\beta) = R - r \cdot [1 + \cos(\beta)] \quad \text{mit } r_0 = R - r \quad (4-3)$$

$$y_{K_2'} = r \cdot \sin(\beta) \quad (4-4)$$

$$\overline{K_1K_2} = \sqrt{(x_{K_1} - x_{K_2})^2 + (y_{K_1} - y_{K_2})^2} \quad (4-5)$$

Durch Einsetzen von (4-1) bis (4-4) in (4-5) erhält man den Abstand zwischen den Punkten K_1 und K_2 in Abhängigkeit vom Kurbeldrehwinkel α und dem Abtriebsstößel-Drehwinkel β :

$$\overline{K_1K_2}(\alpha, \beta) = \sqrt{(R \cdot \cos(\alpha) - \{R - r \cdot [1 + \cos(\beta)]\})^2 + [R \cdot \sin(\alpha) - r \cdot \sin(\beta)]^2} \quad (4-6)$$

Für die z-Koordinate des Punkts K_2 ergibt sich durch Anwendung des Satzes des Pythagoras

$$z_{K_2}(\alpha, \beta) = \sqrt{L^2 - [\overline{K_1K_2}(\alpha, \beta)]^2} \quad (4-7)$$

$$z_{K_2} = \sqrt{L^2 - (R \cdot [\cos(\alpha) - 1] + r \cdot [1 + \cos(\beta)])^2 - [R \cdot \sin(\alpha) - r \cdot \sin(\beta)]^2} \quad (4-8)$$

Die Abhängigkeit der z-Komponente des Abtriebsstößels von den Winkeln α (zeitlich variabel) und β (veränderlich, aber zeitlich konstant) wurde für das aufgebaute Labormuster ($R = 7$ mm, $L = 22$ mm, $r = R / 2 = 3,5$ mm) mittels der Software MATLAB analytisch ermittelt, siehe Abbildung 4-16. Der maximale Hub beträgt dabei ca. 5,03 mm. Man erkennt, dass sich vor allem der untere Totpunkt der Hubbewegung mit dem Winkel β ändert.

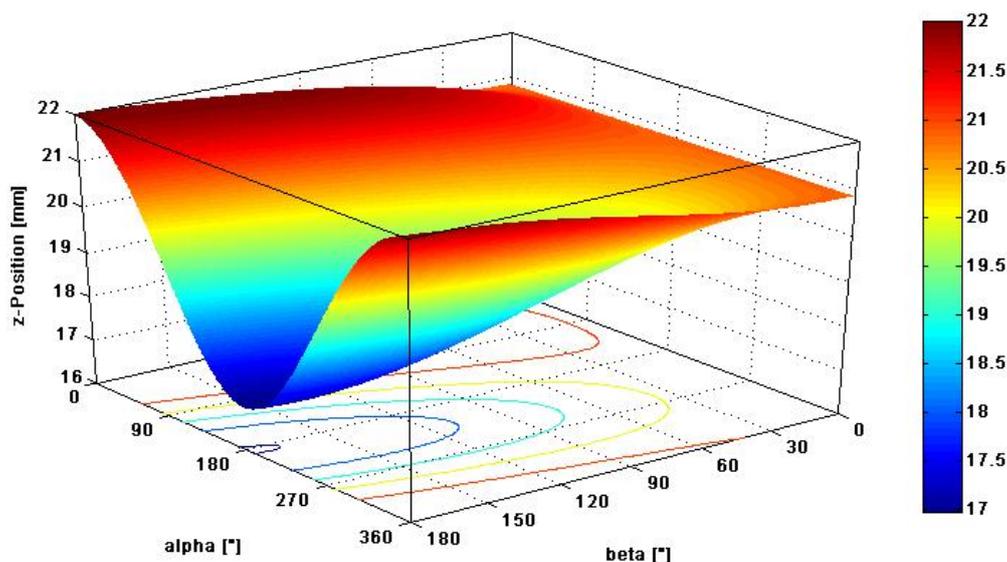


Abb. 4-16 Abhängigkeit der z-Komponente des Abtriebsstößels vom Drehwinkel der Antriebskurbel α und des Abtriebsstößels β für die Parameter des Stabkurbeltrieb-Labormusters

Betrachtet man erneut die Abbildung 4-15, ist zu erkennen, dass die z-Komponente des Punkts K_2 und damit der Nadelherausstand genau dann maximal ist, wenn der Abstand zwischen den Punkten K_1 und K_2' in der x-y-Ebene minimal ist - und umgekehrt. Dieser Sonderfall wird im rechten Teil der Abbildung 4-15 gezeigt. Hierfür lässt sich der Abstand als Differenz vom Antriebskurbelradius R und der Hypotenuse des durch den Winkel δ aufgespannten rechtwinkligen Dreiecks ermitteln. Die Hypotenuse ergibt sich durch Anwendung des Satzes des Pythagoras.

$$\overline{K_1 K_2'} \Big|_{\text{minimal}} = R - \sqrt{(x_{K_2'})^2 + (y_{K_2'})^2} \quad (4-9)$$

$$\overline{K_1 K_2'} \Big|_{\text{minimal}}(\beta) = R - \sqrt{\{R - r \cdot [1 + \cos(\beta)]\}^2 + \{r \cdot \sin(\beta)\}^2} \quad (4-10)$$

Die z-Koordinate des Punkts K_2 ermittelt man als Kathete eines rechtwinkligen Dreiecks mittels Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannte Hypotenuse L und der als Abstand zwischen K_1 und K_2' ermittelten Kathete.

$$z_{K_2'}(\beta) = \sqrt{L^2 - (\overline{K_1 K_2'})^2} \quad (4-11)$$

$$z_{K_2'}(\beta) = \sqrt{L^2 - \left\langle R - \sqrt{\{R - r \cdot [1 + \cos(\beta)]\}^2 + \{r \cdot \sin(\beta)\}^2} \right\rangle^2} \quad (4-12)$$

Die Abbildung 4-17 stellt die Abhängigkeit des oberen Totpunkts der abtriebsseitigen Kugelpfanne K_2 vom Winkel β und damit die Form einer abgewickelten Ausgleichs-Drehkulisse für ein Winkelintervall von 0° bis 180° grafisch dar. Für die analytische Ermittlung des Kurvenverlaufs wurden die geometrischen Verhältnisse beim Labormuster herangezogen. Auf einen Halbzylinder aufgewickelt und seitlich als Projektion auf die x-z-Ebene betrachtet, ergibt sich die Form des durch K_2 beschriebenen Kreisbogens (vgl. Abbildung 4-18, blaues Kreissegment).

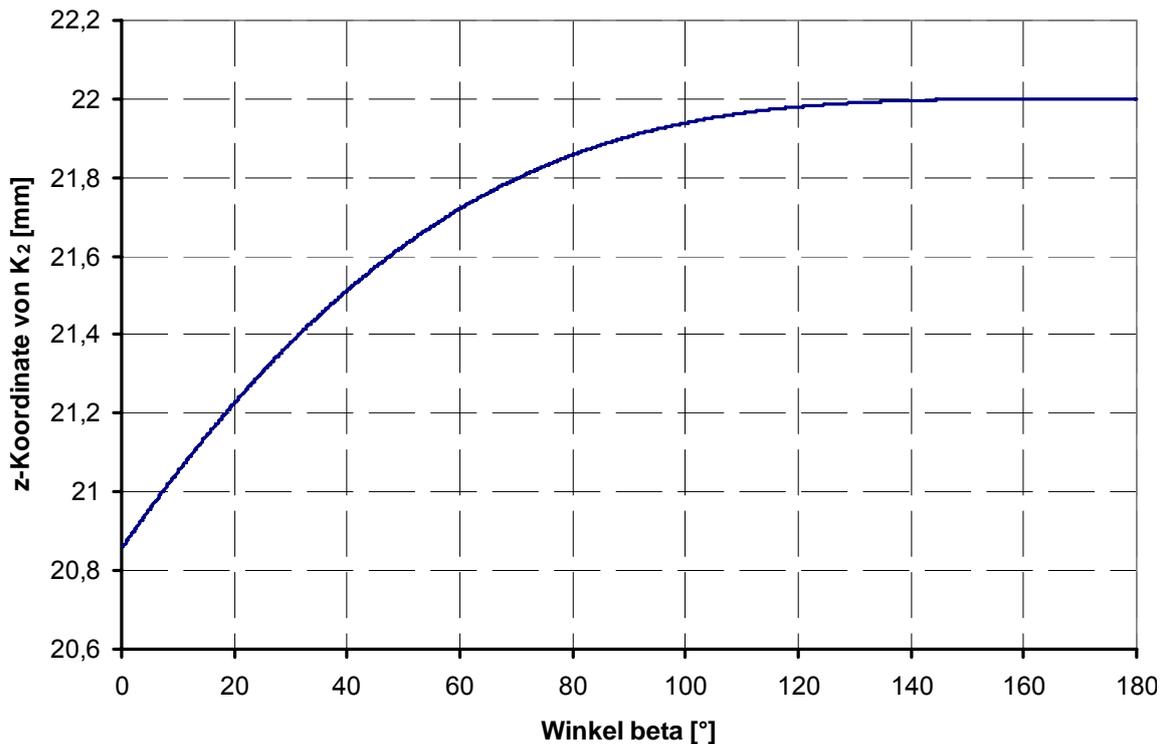


Abb. 4-17 Funktioneller Zusammenhang des oberen Totpunkts der abtriebsseitigen Kugelpfanne K_2 vom Winkel β nach (4-12) für die Parameter des Stabkurbeltrieb-Labormusters

Für dieses Antriebskonzept ist ein kleiner Kraftwirkwinkel γ für jeden Winkel α und β vorteilhaft, siehe die Abbildung 4-15. Je größer γ ist, desto größer ist die radiale Belastung auf das Lager des Abtriebsstößels. Allgemein gilt, dass der Winkel γ genau dann maximal wird, wenn auch der Abstand zwischen K_1 und K_2' maximal ist. Dieser lässt sich - ohne näher auf die Herleitung einzugehen - als Summe der x- und der y-Koordinaten von K_1 und K_2' mittels Satz des Pythagoras ermitteln.

Die Abbildung 4-18 zeigt die schematischen Verhältnisse in der x-z-Ebene für den Fall, dass ein maximaler Kraftwirkwinkel γ_{\max} sowie die Grenzen für die Hubeinstellung h_{\min} bis h_{\max} als Zielgrößen der Konstruktion bzw. Antriebssynthese vorgegeben sind und davon abhängig die Größen L, R und r bestimmt werden sollen.

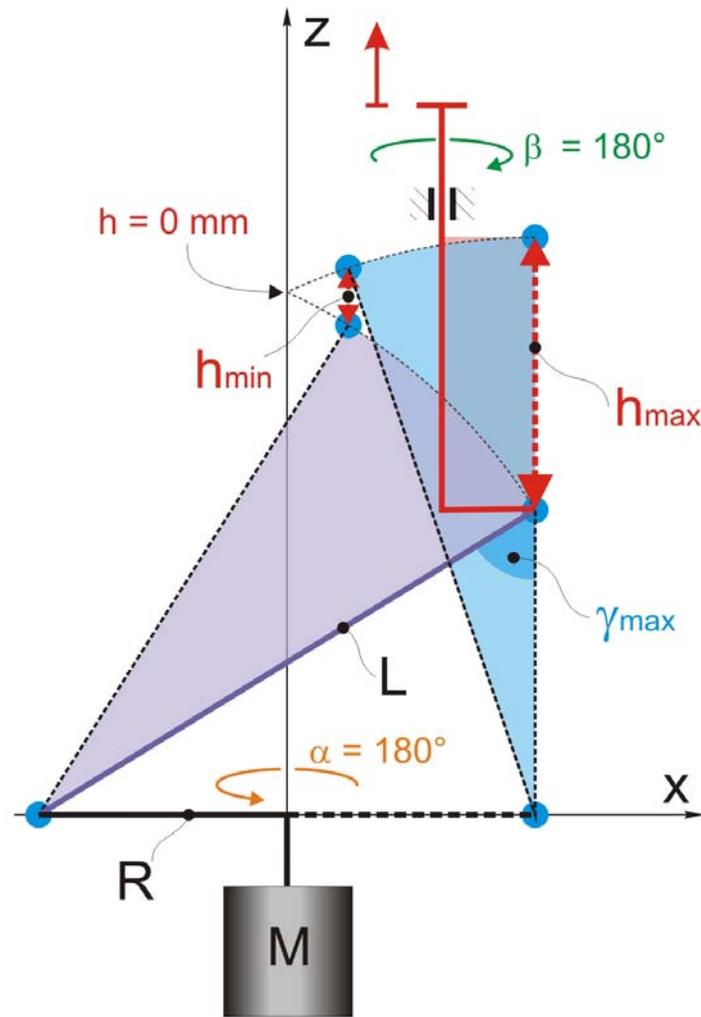


Abb. 4-18 Schematische Verhältnisse für die Bestimmung der Antriebsparameter aus Zielvorgaben

Es ergeben sich folgende Zusammenhänge, wonach sich L und R analytisch aus den Vorgaben bestimmen lassen.

$$\cos(\gamma_{\max}) = \frac{L - h_{\max}}{L} \Rightarrow L = \frac{h_{\max}}{1 - \cos(\gamma_{\max})} \quad (4-13)$$

$$\sin(\gamma_{\max}) = \frac{2 \cdot R}{L} \Rightarrow R = \frac{\sin(\gamma_{\max})}{2} \cdot L = \frac{h_{\max} \cdot \sin(\gamma_{\max})}{2 \cdot [1 - \cos(\gamma_{\max})]} \quad (4-14)$$

Anhand (4-15) erkennt man, dass sich der Radius r für den Kreisbogen der Abtriebsstößel-Kugelpfanne für den Fall $h_{\min} > 0$ nicht analytisch, jedoch numerisch, grafisch oder iterativ bestimmen lässt.

$$h_{\min} = \sqrt{L^2 - 4 \cdot r^2} - \sqrt{L^2 - 4 \cdot (R - r)^2} \quad (4-15)$$

In der Abbildung 4-19 sind die Abhängigkeiten der Pleuelstablänge L und des Kurbelkreisradius R von den vorgegebenen Werten für den maximal zulässigen Kraftwirkwinkel γ_{\max} und den maximalen Hub h_{\max} auf einem ausgewählten Bereich dargestellt.

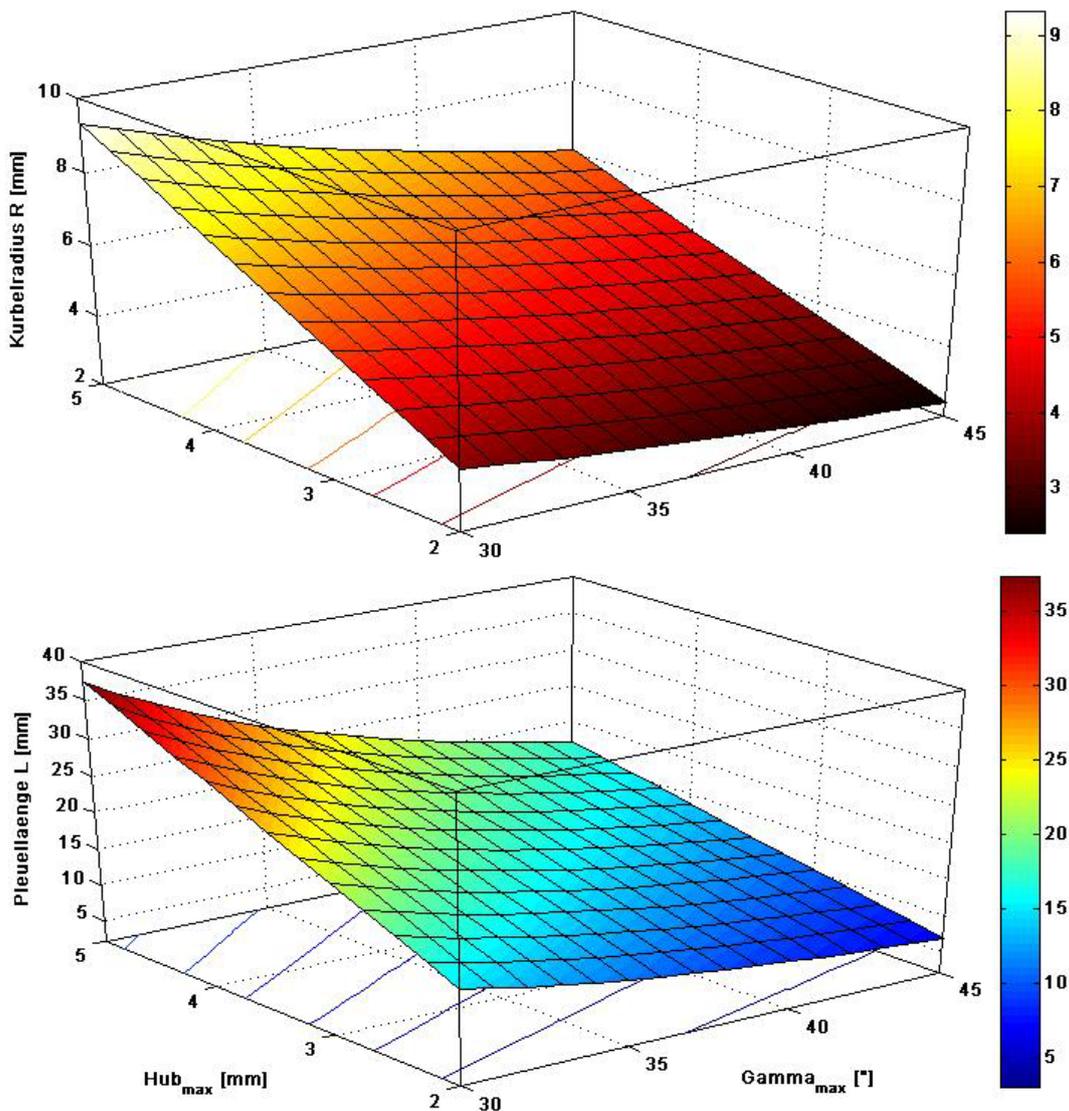


Abb. 4-19 Abhängigkeit der Konstruktionsgrößen L und R auf einem vorgegebenen Bereich für γ_{\max} und h_{\max} , oben das Kennfeld für R, unten für L

Man erkennt, dass vor allem die resultierende Länge L des Stechaktors bei großem Hub und geringem Kraftwirkwinkel große Werte annimmt. Dieser Zusammenhang ist nicht linear, so dass sich mit geringen Abstrichen bezüglich γ_{\max} und h_{\max} bereits akzeptable Werte für L und R erzielen lassen: werden beispielsweise $\gamma = 35^\circ$ und $h_{\max} = 5$ mm gefordert, resultieren eine Pleuelstablänge $L \approx 27$ mm und ein Kurbelradius $R \approx 8$ mm.

Der Stabkurbeltrieb vereint die Vorteile der koaxialen Anordnung eines stiftförmigen Stechgeräts und eines großen Hubs mit einer Möglichkeit zur Hubeinstellung im laufenden Betrieb.

Nachteilig ist die anspruchsvolle Gestaltung bei der gelenkigen Verbindung und der Drehentkopplung der Pleuelstabelemente.

4.1.4 Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 3: Querkurbeltrieb

Der Querkurbeltrieb ist eine weitere neuartige Variante eines Kurbeltriebs. Dabei wird das beim klassischen Kurbeltrieb und bei der Erzeugung einer Hubbewegung üblicherweise störende seitliche Schwenken der Pleuellängsachse genutzt. Diese Schwenkbewegung lässt sich auf verschiedene Arten über einen Umlenkpunkt in gewisser Entfernung zur Motorlängsachse und mit entsprechendem Hebelverhältnis verstärken und günstig beeinflussen. Dabei wird meist eine Gleitbewegung ausgeführt, die es konstruktiv zu beherrschen gilt.

Da die Längsachse der am derart modifizierten Pleuel vorrangig abgegriffenen Nadelbewegung quer zur üblichen, klassischen Kolbenbewegung eines Kurbeltriebs liegt, wurde dieses Antriebskonzept Querkurbeltrieb (QKT) bezeichnet. Es wurden bisher acht Basis-Varianten der Umlenkung und davon abgeleitete entwickelt und untersucht, siehe Abbildung 4-20.

In der nachfolgenden Auflistung werden die Varianten gemäß der Abbildung 4-20 näher beschrieben, die detaillierten vektoriellen Zusammenhänge, mathematischen Beschreibungen und Herleitungen findet man zumeist im Anhang. Teilweise bauen einzelne Varianten aufeinander auf, bewirken aber eine veränderte Bewegungsschleife des oberen Pleuelauges und wurden daher als eigenständige Variante aufgefasst.

- Variante 1: der Gleitstift C ist fest mit dem Pleuel verbunden und gleitet in einer Längsnut, die unter einem Winkel δ zur x-Achse verläuft
- Variante 2: der Gleitstift C ist ortsfest und gleitet in einer Nut in der Pleuellängsachse
- Variante 3: der Gleitstift C ist ortsfest und drehbar mit dem Pleuel verbunden, die Antriebskurbel B gleitet auf der rückwärtigen Verlängerung der Pleuellängsachse in einer Nut
- Variante 4: der Gleitstift C ist ortsfest und drehbar mit dem Pleuel verbunden, die Motorwelle der Antriebskurbel A gleitet in einer Nut, die unter einem Winkel δ zur x-Achse verläuft
- Variante 5: ähnlich Variante 3, die Antriebskurbel gleitet jedoch zwischen den beiden Pleuelaugen C und D
- Variante 6: ähnlich Variante 1, der Gleitstift befindet sich jedoch außerhalb der Verbindungslinie beider Pleuelaugen B und D
- Variante 7: Kombination aus Variante 1 und 2, wobei der Abstand des Gleitstifts C durch eine zusätzliche Kurbel ohne oder mit festem oder zeitveränderlichem Phasenwinkel λ bestimmt wird
- Variante 8: ähnlich Variante 2, es existiert jedoch eine gewisse Schränkung (Parallelversatz) zwischen der Pleuelaugenverbindungsline B und D und der Gleitstift-Gleitnut C im Pleuel
- Variante 9: Kombination aus Variante 2 und 5, die Antriebskurbel wie in Variante 2, der Gleitstift C rotiert vorzugsweise gegensinnig mit fester Phase (siehe Anhang)

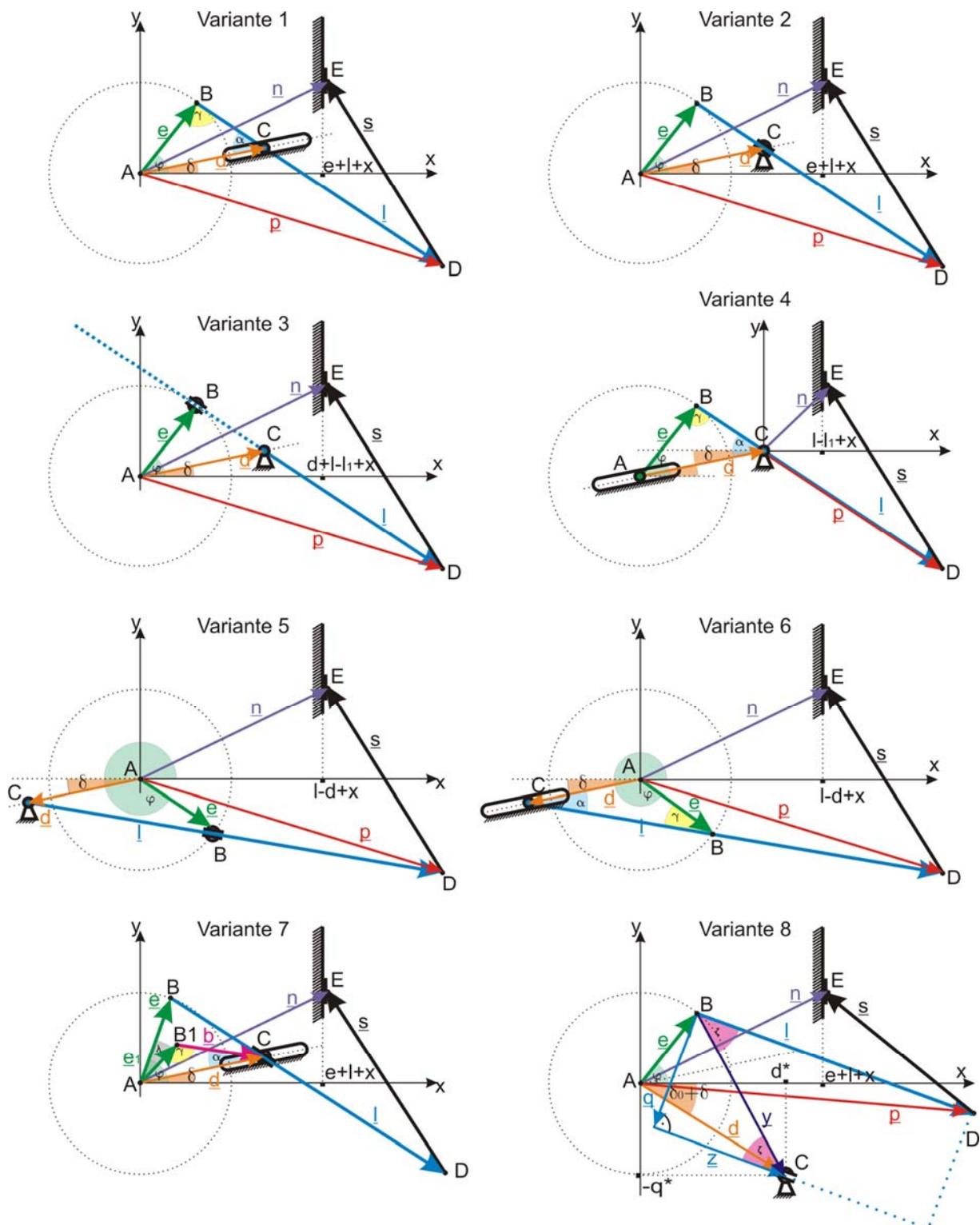


Abb. 4-20 Zusammenstellung einiger Basis-Varianten des Querkurbeltriebs

Es kann für die Dynamik zudem günstig sein, die Forderung nach einer in der Pleuellängsachse liegenden und insbesondere linearen Gleitnut in Richtung AC aufzugeben. Denkbar sind beispielsweise eine Neigung (Schrägung), eine Schränkung (Parallelversatz = Variante 8),

eine Krümmung der Nut oder eine Kombination davon. Diese weiterführenden Varianten seien an dieser Stelle lediglich genannt und wurden nicht tiefer gehend untersucht.

Die analytischen Ausdrücke (siehe auch Anhang) wurden in das Programm MATLAB® übertragen, um die Position des Nadelkolbens E sowie dessen Geschwindigkeit bei jeder Variante zu ermitteln und mit den Ergebnissen anderer Varianten zu vergleichen. Hierfür wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt, ein so genanntes GUI (Graphical User Interface), mithilfe dessen alle Parameter der Varianten separat geändert werden können.

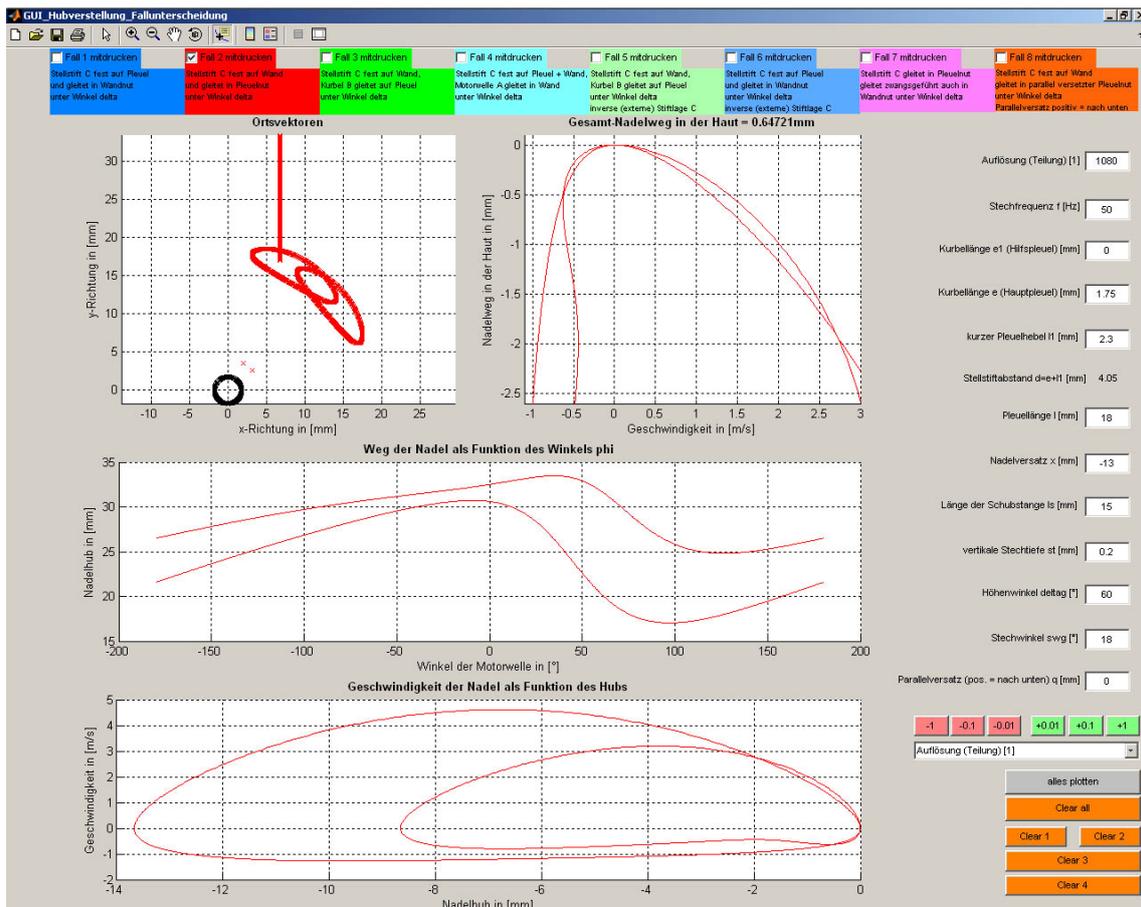


Abb. 4-21 GUI für die vergleichende Untersuchung der QKT-Varianten, hier Variante 2 dargestellt

QKT-Demonstrator (Variante 2)

Für die Entwicklung eines Stechgeräts mit möglichst hoher Einstechgeschwindigkeit und genügend langer Dosierphase sowie einer Einstellmöglichkeit für den Nadelherausstand wurde ein Demonstrator und ein darauf aufbauender Prototyp 1 gemäß der QKT-Variante 2 aufgebaut, bei dem das untere Pleuelauge durch einen rotierenden Exzenter bewegt wird und zwischen unterem und oberem Pleuelauge ein zum Gehäuse feststehender Umlenkpunkt in einer Längsnut im Pleuel gleitet. Vom oberen Pleuelauge wird die Bewegung schließlich über eine Schubstange auf den Abtriebskolben oder -stößel übertragen, siehe Abbildung 4-22. Diese Antriebsvariante weist bereits am Demonstrator eine dreimal höhere Nadeleinstechgeschwindigkeit gegenüber der Rückholgeschwindigkeit auf, wie die Abbildung 4-27 belegt. Zusätz-

lich fällt die Stechgeschwindigkeit beim Einstechvorgang bezüglich des Wegs erst spät ab, was günstig für das Erreichen geringer Stechtiefen ist.

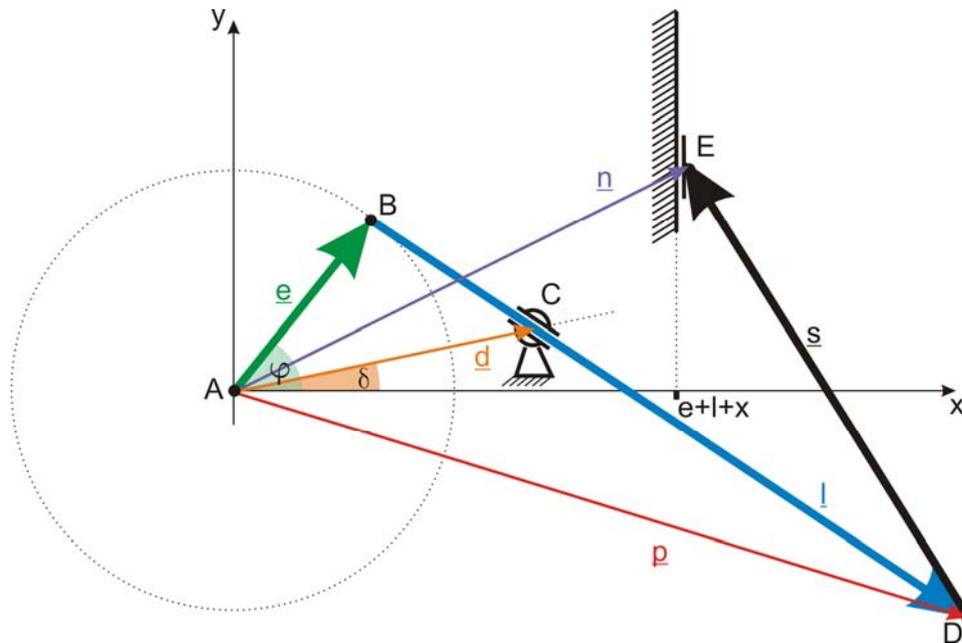


Abb. 4-22 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse für die Variante 2

Um die formale Abhängigkeit der Kolbenbewegung vom zeitveränderlichen Antriebsdrehwinkel $\varphi(t)$ und vom zeitinvarianten, einstellbaren Höhenwinkel δ herstellen zu können, wurde zunächst die Kolbenbewegung vektoriell beschrieben. Für den Winkel $\varphi(t)$ kann jede Zeitabhängigkeit angenommen werden, in (4-16) wird beispielhaft ein linearer zeitlicher Zusammenhang, resultierend aus einer konstanten Motordrehzahl, dargestellt.

$$\varphi(t) = 2\pi \cdot f \cdot t = \frac{2\pi}{T} \cdot t = \omega_0 \cdot t \quad \text{mit } \omega_0 = \text{const.} \quad (4-16)$$

Es lässt sich der Kurbelvektor \underline{e} als Funktion des zeitabhängigen Drehwinkels $\varphi(t)$ und der konstanten Kurbellänge e schreiben:

$$\bar{\underline{e}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) & -\sin(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) & \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix}}_{\text{2D-Drehmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Vektor } \underline{e}_0} = e \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

In der Abbildung 4-22 stellt der Punkt (C) einen zylindrischen Gleitstift dar, der in einer Langnut im Pleuel (BD) gleitet, welche in der gedachten Pleuellängsachse liegt. (C) ist fest mit einem um die Motorachse drehbaren Gleitstiftträger (GST) verbunden, dessen Drehwinkel δ zeitlich konstant gehalten und nur zur Einstellung des Nadelherausstands verändert wird.

Das Bezugskordinatensystem hat seinen Ursprung in der Dreh- und Symmetrieachse der Motorwelle, dem Punkt (A). Der Vektor \underline{e} stellt die Verbindung zwischen dem Punkt (A) und dem Mittelpunkt (B) des unteren Pleuelauges dar. Sein Betrag sei e und zeitlich konstant. Der Vektor \underline{l} verbindet das untere Pleuelauge (B) mit dem oberen Pleuelauge (D). Der Betrag von \underline{l} sei l . Der Vektor \underline{d} stellt die Koordinaten des Gleitstifts (C) dar, sein Betrag sei d und zeitlich konstant. Er schließt den Höhenwinkel δ mit der Abszisse ein. Dieser stellt, wie bereits oben beschrieben, die Variable für die Einstellung des Nadelherausstands dar. Der Vektor \underline{p} zeigt auf die Koordinaten des oberen Pleuelauges (D). Der Vektor \underline{s} stellt die Längsachse der Schubstange (DE) dar, welche das obere Pleuelauge (D) mit dem Kolben (E) verbindet. Der Kolben (E), welcher die Nadel aufnehmen soll, besitzt eine feste x-Koordinate, lediglich die y-Koordinate ist zeitvariant. Der Vektor \underline{n} zeigt dabei auf die Koordinaten des Kolbens (E) bezüglich des Koordinatensystems.

Der hier zeitlich konstante Vektor \underline{d} , welcher vom Koordinatenursprung (A) zum Gleitstift (C) zeigt, ergibt sich zu:

$$\bar{d}(\delta) = d \cdot \begin{bmatrix} \cos(\delta) \\ \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad \text{mit } d, \delta = \text{const.} \quad (4-18)$$

Der zeitabhängige Vektor \underline{l} wird nachfolgend unter Verwendung seines Betrages l errechnen:

$$\bar{l}(t, \delta) = l \cdot \underbrace{\frac{\bar{d}(\delta) - \bar{e}(t)}{|\bar{d}(\delta) - \bar{e}(t)|}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l = \text{const.} \quad (4-19)$$

Es ergibt sich der Ortsvektor \underline{p} des oberen Pleuelauges (D) im Koordinatensystem:

$$\bar{p}(t, \delta) = \bar{l}(t, \delta) + \bar{e}(t) \quad (4-20)$$

Der Lagevektor \underline{s} der Schubstange (DE) bildet mit der Vertikalen durch den Punkt (E) und mit der Horizontalen durch den Punkt (D) ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mittels Satz des Pythagoras unter Verwendung der vorgegebenen Länge der Schubstange l_s und der bekannten x-Position des Punkts (E) ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors \underline{p} , und x einen frei wählbaren Wert für den horizontalen Versatz des Kolbens (E) von der x_0 -Bezugslage $e + l$ darstellen:

$$\bar{s}(t, \delta) = \left[\frac{e + l + x - p_x(t, \delta)}{\sqrt{l_s^2 - (e + l + x - p_x(t, \delta))^2}} \right] \quad (4-21)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

Als Summe der Vektoren \underline{p} und \underline{s} ergibt sich schließlich der auf den Kolben (E) zeigende Vektor \underline{n} im Koordinatensystem:

$$\bar{n}(t, \delta) = \bar{s}(t, \delta) + \bar{p}(t, \delta)$$

$$\bar{n}(t, \delta) = \left[\frac{e + l + x}{\sqrt{l_s^2 - (e + l + x - p_x(t, \delta))^2} + p_y(t, \delta)} \right] \quad (4-22)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

Die Abbildung 4-23 zeigt für die verwendete QKT-Variante 2 beispielhaft die Abhängigkeit der y-Komponente des Nadelvektors (z-Achse) vom Kurbelwinkel φ (x-Achse) auf dem Intervall $[-180^\circ, 180^\circ]$ und vom Höhenwinkel δ (y-Achse) auf dem Intervall $[40^\circ, 60^\circ]$. Dabei sind der Kurbelradius $e = 1,75$ mm, der Stellstiftabstand $d = 4,5$ mm, die Pleuellänge $l = 23$ mm, die Schubstangenlänge $l_s = 30$ mm, die x-Komponente des Nadelvektors $n_x = e + l + x = 3,4$ mm.

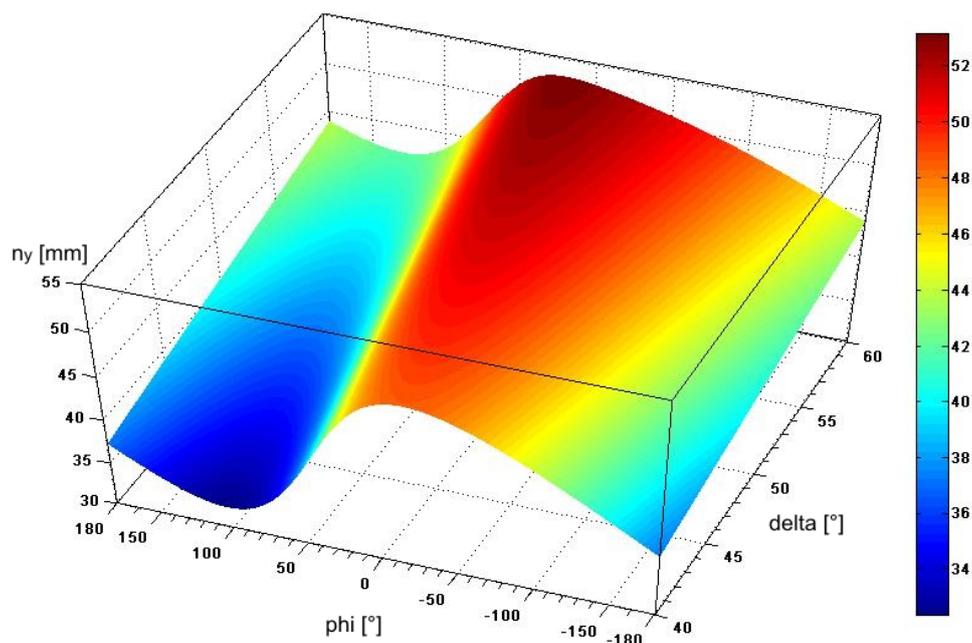


Abb. 4-23 Abhängigkeit der y-Komponente der Nadelposition von φ und δ , siehe Text

Um die Geschwindigkeit des Kolbens (E) zu erhalten, wird die Zeitableitung des Nadelvektors gebildet:

$$\vec{v}_{\text{Kolben}}(t_i, \delta) = \dot{\vec{n}}(t_i, \delta) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{n}(t_i + \Delta t, \delta) - \vec{n}(t_i, \delta)}{\Delta t} \quad (4-23)$$

Bei hoher zeitlicher Auflösung und damit sehr kleinem Δt kann für die Ermittlung der Geschwindigkeit mit ausreichender Genauigkeit mit dem Differenzenquotienten gerechnet werden.

$$\vec{v}_{\text{Kolben}}(t_i, \delta) \approx \underbrace{\frac{\vec{n}(t_i + \Delta t, \delta) - \vec{n}(t_i, \delta)}{\Delta t}}_{\text{für ein sehr kleines } \Delta t} \quad (4-24)$$

Die Variation des Höhenwinkels δ stellt eine Möglichkeit dar, den Nadelherausstand und gleichzeitig den Hub zu ändern. Bei der Entwicklung des Demonstrators und des Prototyps 1 stand die Einstellmöglichkeit für den Nadelherausstand im Vordergrund.

Bei der Entwicklung des Demonstrators wurden mittels GUI-Analyse geeignete geometrische Abmessungen für die zu konstruierenden Getriebeteile ermittelt. Anschließend wurde für den so bestimmten Antrieb der zu erwartende Nadelhub, das Einstellintervall für den Nadelherausstand und die Geschwindigkeits-Weg-Funktion untersucht und mit dem Stand der Technik verglichen. Folgende Parameter wurden für den Demonstrator festgelegt: Pleuellänge $l = 13$ mm, Schubstangenlänge $l_s = 30$ mm, Kurbellänge $e = 2$ mm, Gleitstiftabstand $d = 4,5$ mm, seitlicher Versatz $e + l + x = 3,4$ mm bei einer konstanten Stechfrequenz $f = 104,773$ Hz sowie bei variablen Höhenwinkeln $\delta \in \{40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 63^\circ\}$. Es ergeben sich die Geschwindigkeits-Weg-Funktionen, wie sie in der Abbildung 4-24 dargestellt sind. Negative Geschwindigkeiten werden der Stechbewegung, positive der Rückholbewegung zugeordnet, wobei der linke Totpunkt der Nadelbewegung bei einem Höhenwinkel $\delta = 40^\circ$ als Bezugslage für den Nadelherausstand gewählt wurde.

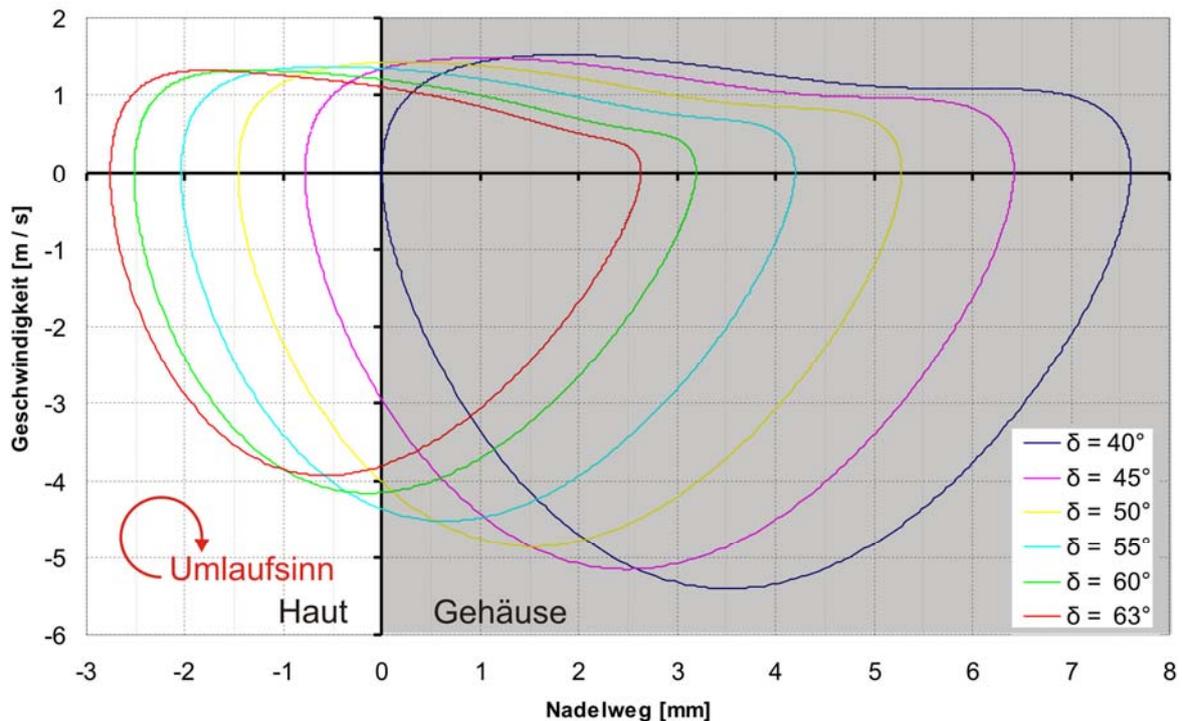


Abb. 4-24 Die Geschwindigkeits-Weg-Funktionen am Querkurbeltrieb-Demonstrator bei verschiedenen Höhenwinkeln δ und konstanter Stechfrequenz $f = 104,773$ Hz

Man erkennt bei allen Kurven für den Bereich „Haut“ während der Rückholbewegung einen annähernd konstanten Verlauf der Geschwindigkeit. Bei zunehmendem Nadelherausstand steigt die Einstechgeschwindigkeit anfänglich und bleibt dann relativ konstant. Das Verhältnis von Einstech- zu Rückholgeschwindigkeit an der virtuellen Gehäusegrenze ist annähernd 4.

Die Abbildung 4-25 vergleicht die Geschwindigkeits-Weg-Funktionen ausgewählter Antriebskonzepte mit der des Querkurbeltriebs (QKT), bzw. am Demonstrator gemessenen. Hierfür wurde aus den oben gezeigten Ergebnissen die Kurve für den Höhenwinkel $\delta = 63^\circ$ herangezogen. Der Hub beträgt dabei nur ca. 5,4 mm, was am besten vergleichbar mit den marktüblichen Antriebskonzepten ist. Man erkennt den Vorteil des QKT-Antriebskonzepts.

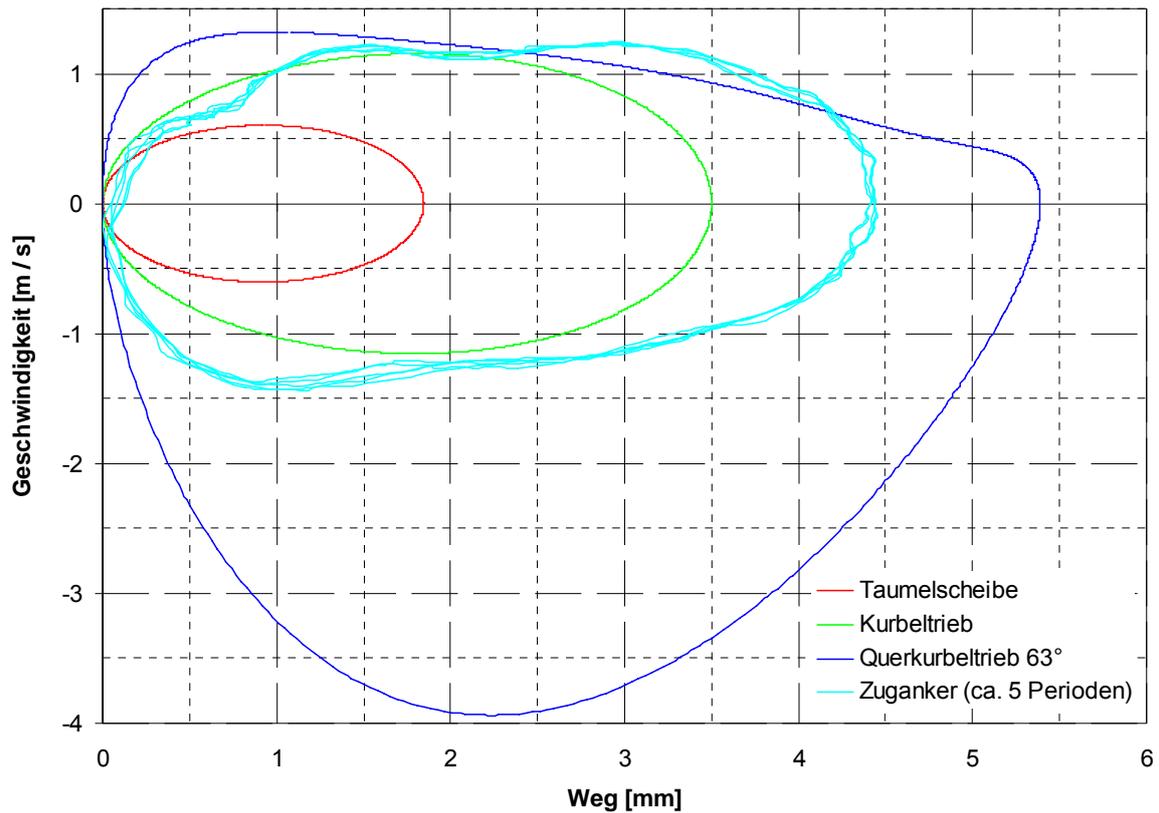


Abb. 4-25 Die Geschwindigkeits-Weg-Funktionen einiger Antriebskonzepte bei gleicher Stechfrequenz

Das Funktionsprinzip wurde experimentell an einem Demonstrator untersucht. Den vorrangig aus PMMA-Teilen gefertigten und aufgebauten Demonstrator zeigt die Abbildung 4-26.

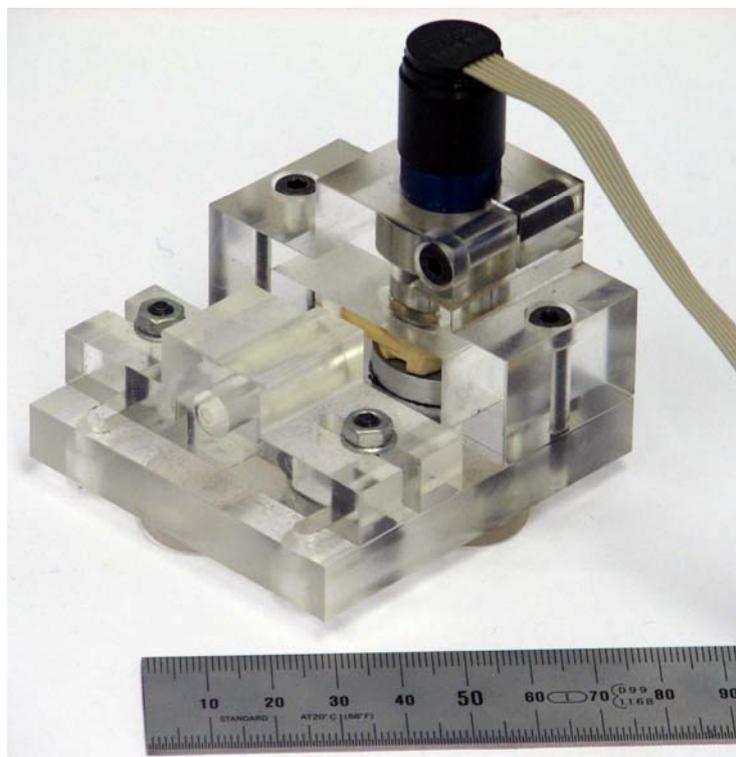


Abb. 4-26 Querkurbeltrieb-Demonstrator im Größenvergleich

Die Abbildung 4-27 zeigt die Geschwindigkeits-Weg-Funktion, gemessen mit einem Laser-Triangulationssensor hoher zeitlicher Auflösung am Demonstrator für zwei Höhenwinkel bei einer Arbeitsfrequenz von ca. 45 Hz und in axialer Kolbenrichtung. Eine negative Geschwindigkeit ist der Stechbewegung, eine positive der Rückholbewegung zuzuordnen. Zusätzlich wurde der vordere Totpunkt für einen Höhenwinkel $\delta = 40^\circ$ als Gehäusegrenze für die Messung des Nadelherausstands definiert. Man erkennt für beide Kurven den Unterschied der Nadelgeschwindigkeit für die Stech- und die Rückholbewegung.

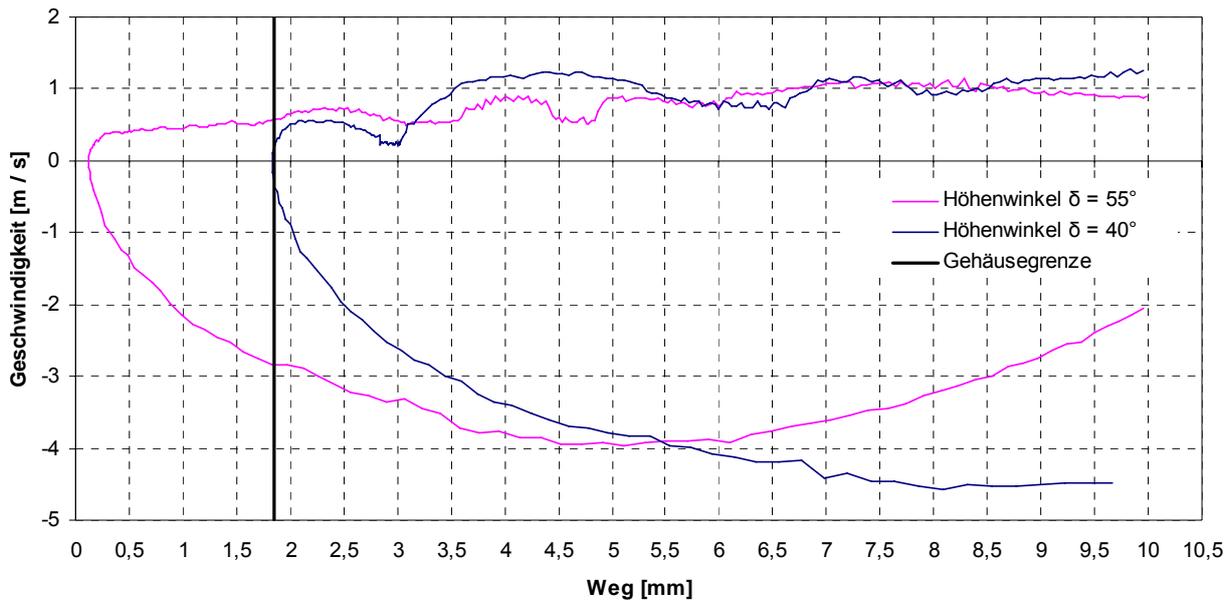


Abb. 4-27 Am Demonstrator gemessene Geschwindigkeits-Weg-Funktionen für zwei Höhenwinkel

Die positiven Ergebnisse am Demonstrator motivierten die Entwicklung eines praxisnahen Stechgeräts, welches sich durch eine zusätzliche Fluidikbaugruppe zu einem aktiv applizierenden Stech- oder Impfgerät modifizieren lässt, siehe hierzu [Loth11].

Prototyp 1

Für den Prototyp 1 war eine Verwendung als Stechaktor in einem aktiv applizierenden Impfgerät für das intrakutane DNS-Impfen vorgesehen. Das Höhenwinkel-Intervall wurde aus konstruktiven Gründen für die weiteren Entwicklungen von $[40^\circ; 63^\circ]$ beim Demonstrator auf $[40^\circ; 61,5^\circ]$ begrenzt, um bei der Pleuelbewegung einen geringfügigen Epizyklus zu vermeiden. Es wurde zudem eine Stechfrequenz von 50 Hz gewählt, die durch den zur Verfügung stehenden Motor und die Forderung nach möglichst langer Dosierphase während des Nadel-Rückholvorgangs favorisiert wurde. Die geometrischen Abmessungen wurden auf der Grundlage des Demonstrators den Anforderungen eines aktiv applizierenden Aktors mit hoher Stechgeschwindigkeit angepasst: Pleuellänge $l = 23$ mm, Schubstangenlänge $l_s = 30$ mm, Kurbellänge $e = 2$ mm, Gleitstiftabstand $d = 4,5$ mm, seitlicher Versatz $e + l + x$ (Variante 2) $= 3,4$ mm.

Zur Einstellung des Nadelherausstands steht ein vergleichsweise kleines Intervall für den Höhenwinkel $\delta \in [40^\circ; 61,5^\circ]$ von $21,5^\circ$ zur Verfügung. Für eine manuelle Einstellung des Na-

delherausstands ist eine Vergrößerung dieses Intervalls durch ein Getriebe sinnvoll, um eine fein dosierte Bedienung zu ermöglichen und um eine hohe Auflösung bei der Skalenteilung realisieren zu können. Dabei ist ein selbst sperrendes Getriebe zu bevorzugen oder eine Festlegung des Getriebes vorzusehen, da die im laufenden Betrieb auf den Gleitstift (Punkt C in Abbildung 4-22) und damit auf dessen lagerndes Bauteil (Gleitstiftträger, GST) wirkenden Lasten wechselnde und hohe Amplituden aufweisen. Wegen der hohen Kosten sowie der Anzahl an zusätzlichen Bauteilen konnten übliche Getriebekonzepte, wie das Harmonic Drive, ein ein- bis mehrstufiges Umlaufgetriebe, ein Spindeltrieb oder ein Metallband-Flaschenzug nicht verwendet werden. Daher wurde ein einfaches Exzenter-Hebel-Getriebe entwickelt, um eine Untersetzung des Drehwinkels von einem Winkel größer als 180° auf ein Drehwinkelintervall für den Höhenwinkel δ von $21,5^\circ$ zu erhalten.

Das Prinzip des Getriebes wird in der Abbildung 4-28 schematisch veranschaulicht, die Abbildung 4-29 zeigt die Verhältnisse am fertig aufgebauten und teilmontierten QKT-Prototyp 1. Ein mit dem Prototypgehäuse im Punkt (A) fest verbundener Zylinderstift dient als Drehpunkt für den Hebel (AD). In dem Hebel (AD) befinden sich zwei Langnuten: für den steuernden Kurbelzapfen (C), der mit dem durch den Bediener drehbaren Gehäuseteil verbunden ist, und den gesteuerten Zapfen (D), der im Abstand r vom Mittelpunkt des von der Rückseite des Gleitstiftträgers abstrebt. Der Kurbelzapfen (C) wird durch einen Exzenter gebildet, welcher um den Punkt (B) drehbar gelagert ist. Der gesteuerte Zapfen (Stellstift D) erzeugt beim Drehen der Kurbel \underline{e} um den Punkt B ein auf den Gleitstiftträger wirkendes Drehmoment um den Punkt (B) und die Drehung der Kurbel \underline{r} . Wird beispielsweise durch eine Drehung des Gehäuseteils, bzw. der Kurbel (BC) das grün dargestellte Bogenstück überstrichen, überstreicht das Exzenter-Hebel-Getriebe mit dem Gleitstiftträger und der Kurbel (BD) das grau dargestellte Bogenstück. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstäblich dargestellt.

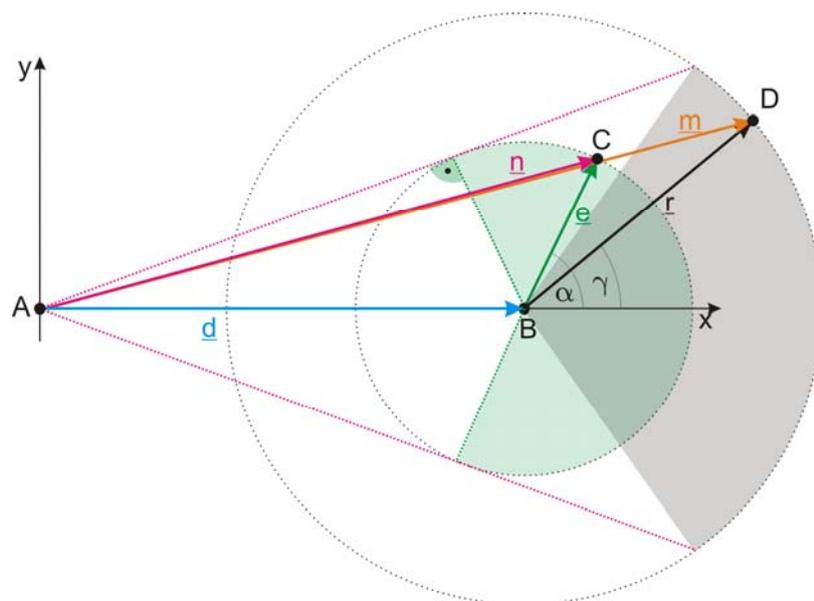


Abb. 4-28 Verhältnisse am Exzenter-Hebel-Getriebe bei beliebiger Einstellung der Winkel

Man erkennt gut die Abhängigkeit des Untersetzungsverhältnisses für die Winkel α und γ von den drei unabhängigen Parametern Hebellänge d sowie den Radien e und r . In der Abbildung

4-29 ist im rechten Bild außerdem gut zu sehen, dass der Umlenk- oder Gleitstift für das Pleuel des QKT (kleiner vorstehender Stahlstift schräg links unterhalb der Messing-Antriebskurbel) nicht identisch ist mit dem Stellstift des Exzenter-Hebel-Getriebes für die Höhenwinkeleinstellung des GST (rückseitig abstrebender größerer Stahlstift schräg rechts oberhalb der Antriebskurbel).

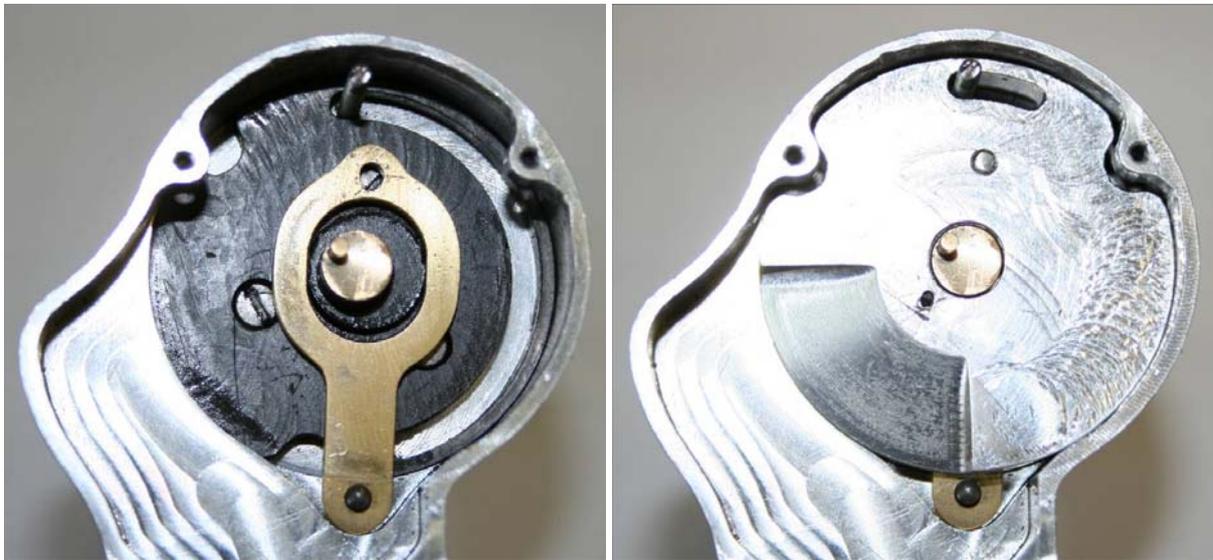


Abb. 4-29 Exzenter-Hebel-Getriebe am fertig aufgebauten Prototyp, links ohne und rechts mit Gleitstiftträger, jeweils in Ausgangslage (Höhenwinkel $\delta_{\min} = 40^\circ$)

Für einen extremalen Winkel α lassen sich die Verhältnisse einfach beschreiben, siehe Abbildung 4-30. Dabei ist für die Winkel α und γ zu beachten, dass sie von der Abszisse gezählt werden und ihre Maxima jeweils den halben zur Verfügung stehenden Einstellbereich beziffern.

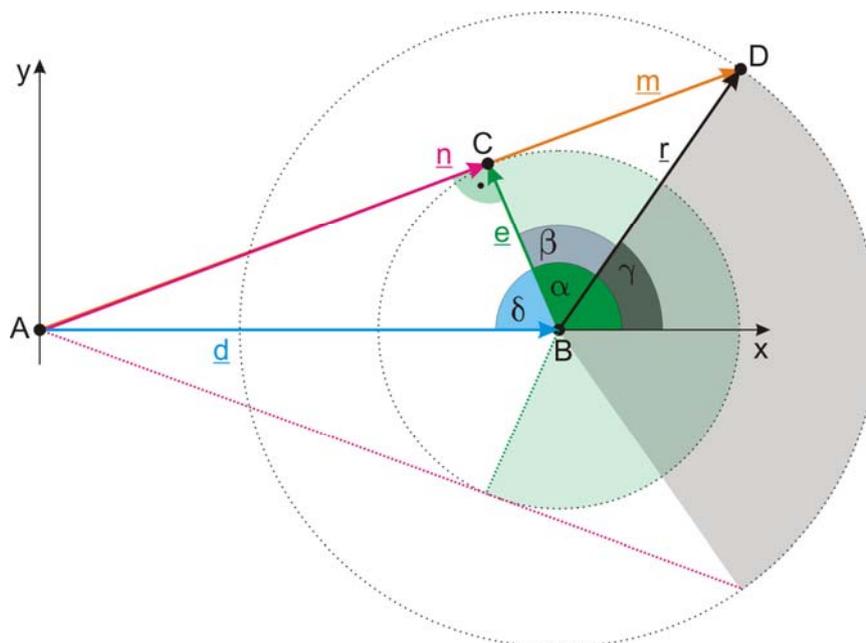


Abb. 4-30 Schematische Verhältnisse am Exzenter-Hebel-Getriebe bei extremaler Winkelstellung

Der Winkel γ ist durch das Höhenwinkelintervall zu $10,75^\circ$ ($21,5^\circ / 2$) vorgegeben, der Winkel α soll ermittelt werden. Dazu müssen zwei der drei Längen d , e und r vorgegeben werden, beispielsweise e und r . In der Abbildung 4-30 sind die Winkel β und δ Innenwinkel zweier rechtwinkliger Dreiecke, sodass folgende Beziehungen gelten:

$$\beta = \arccos\left(\frac{e}{r}\right) \quad (4-25)$$

$$\delta = \pi - (\beta + \gamma) \quad (4-26)$$

$$\cos(\delta) = \frac{e}{d} \quad (4-27)$$

Die Länge d errechnet sich, wenn (4-25) und (4-26) in (4-27) eingesetzt werden und anschließend nach d aufgelöst wird:

$$d = \frac{e}{\cos\left(\pi - \arccos\left(\frac{e}{r}\right) - \gamma\right)} \quad (4-28)$$

Der Winkel α ergibt sich als Summe aus β und γ zu

$$\alpha = \arccos\left(\frac{e}{r}\right) + \gamma \quad (4-29)$$

Für die Konstruktion des Exzenter-Kurbel-Getriebes wurde, abweichend vom beschriebenen Vorgehen, für jede der drei Längen ein Wert mit maximal einer Nachkommastelle angenommen und eine geeignete Kombination ausgewählt, um das geforderte Intervall für den Höhenwinkel darstellen zu können. Dazu wurden die Formeln auf das Tabellenprogramm Microsoft Excel® übertragen, um durch iteratives Vorgehen geeignete Werte für den Drehachsenabstand d , die Exzentrizität der Eingangskurbel e sowie den Gleitstiftträger-Stellradius r zu finden. Die Winkel α und γ wurden dabei als die abhängigen Variablen angesehen. In der Tabelle 4-1 wurden die gewählten geometrischen Abmessungen und die sich daraus ergebenden Winkel zusammengestellt. Mit diesen Werten für das Exzenter-Hebel-Getriebe und unter Einbeziehung der für den Prototyp 1 festgelegten Abmaße für den QKT wurde in MATLAB™ ein Programm für die Berechnung der Skalenteilung erstellt, welches für einen in 0,1 mm-Schritten gestaffelten Nadelherausstand den jeweils entsprechenden Motordrehwinkel-Zuwachs, beginnend bei einem errechneten, extremalen α -Wert als Null- oder Bezugswert, beispielsweise $\alpha = -93,32^\circ$ sei gleich Null, zuordnet.

Drehachsenabstand d [mm]	19,00	
GST-Stellradius r [mm]	8,50	
Exzentrizität der Eingangskurbel e [mm]	1,10	
theoretisch möglicher Drehwinkel 2α am Motorgehäuse [°]	186,64	[-93,32;+93,32]
resultierender möglicher Drehwinkel 2γ am Umlenkstifträger [°]	21,51	[-10,75;+10,75]

Tabelle 4-1 Exzenter-Hebel-Getriebe, Abmessungen und daraus resultierende Winkel

Die Berechnung wurde bei einem getriebeeingangsseitigen Drehwinkelzuwachs für α von insgesamt $166,3^\circ$ abgebrochen, da für größere Werte (maximal $186,64^\circ = 2\alpha$) beim Nadelherausstand kein Zuwachs um einen vollen Schritt von 0,1 mm erhalten wird. Der damit tatsächlich erzeugte Umlenkstifträger-Drehwinkel beträgt immerhin $21,03^\circ$ statt des maximal möglichen Winkels $2\gamma = 21,51^\circ$, was einer Ausnutzung von 97,7 Prozent entspricht. Der so generierte letzte, 43. Skalenstrich entspricht einem Nadelherausstand von 4,2 mm, die kleinste Winkeldifferenz $\Delta\alpha$ für zwei benachbarte Skalenstriche beträgt $2,57^\circ$, wie man anhand der beiden besonders gekennzeichneten Motorgehäusedrehwinkel erkennt, siehe Abbildung 4-31.

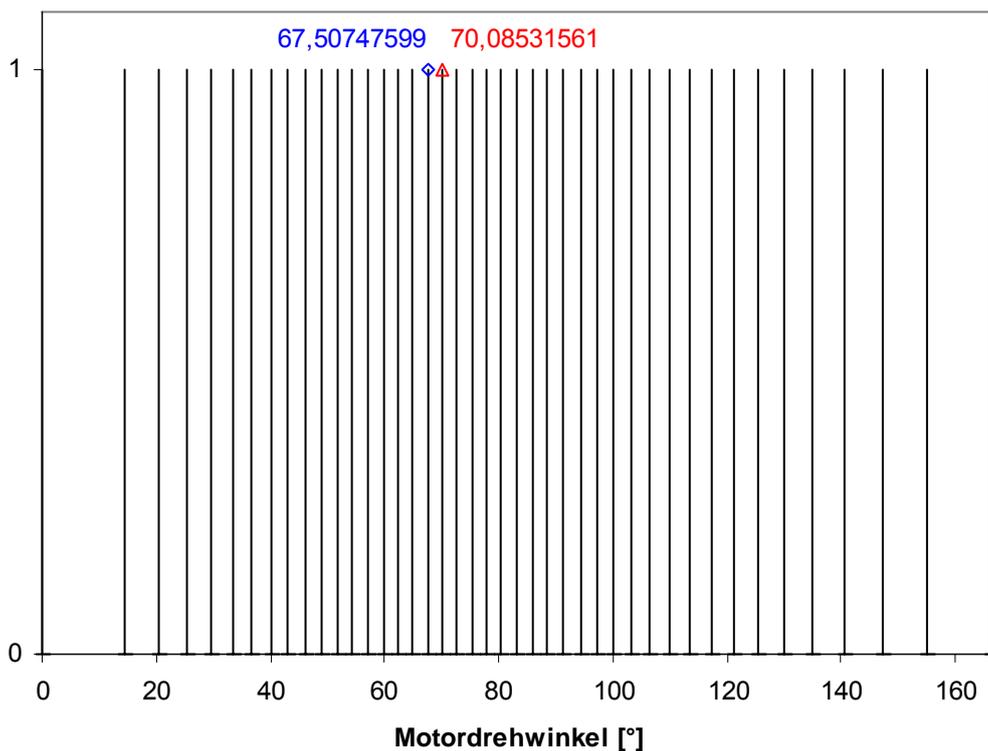


Abb. 4-31 Abstandverteilung für den Drehwinkel α für einen 0,1 mm-Zuwachs beim Nadelherausstand

Mithilfe der so erhaltenen Liste von Winkeln lässt sich eine Skala erstellen und beispielsweise mittels einer spanenden Bearbeitung, einer Laser-Gravur oder eines Aufklebers am drehbaren Gehäuseteil des Prototyps 1 anbringen.

Der vom QKT-Prototyp 1 zur Verfügung gestellte Hub beträgt für einen Höhenwinkel $\delta = 40^\circ$ (Nadelherausstand = 0 mm) etwa 18,5 mm, für einen Höhenwinkel $\delta = 61,1^\circ$ (Nadelhe-

rausstand = 4,2 mm) etwa 12,6 mm, wobei der größte Hub bei einem verschwindenden Nadelherausstand auftritt und keine außerhalb des Geräts genutzte Stechbewegung ausgeführt wird. Außerdem weisen die bewegten QKT-Getriebeteile für diesen Fall die höchsten Geschwindigkeiten auf und erfahren die größten Belastungen (Beschleunigungswerte).

Daher wurde eine Entkopplungsbaugruppe entwickelt, welche, in die mechanische Energieübertragungskette hinter den Querkurbeltrieb geschaltet, die nach außen abgegebene Stechbewegung von der inneren Aktorbewegung partiell abkoppelt, sofern das antriebsseitige Koppellement eine bestimmte Lage nicht überschreitet. Damit kann die Entkopplungsbaugruppe als eine Art mechanischer Schwellwertschalter (Komparator) aufgefasst werden, der die Weitergabe der mechanischen Information erst oberhalb einer konstruktiv festgelegten Schwelle ermöglicht. Vorteilhaft ist dabei, dass im entkoppelten Zustand die mitbewegte Masse deutlich geringer ist, und somit die auftretenden Kräfte, vor allem im Bereich kritischer Bewegungsphasen mit hohen Beschleunigungswerten deutlich reduziert werden. Das An- bzw. Entkoppeln erfolgt mit einer Art mechanischer Überblendfunktion durch zwei Schwenkhebel, siehe die Abbildungen 4-32 und 4-33. Wichtig dabei ist, dass die Schwenkriegel ein sehr geringes Massenträgheitsmoment aufweisen. Dies kann durch eine geeignete Wahl des Materials und eine konstruktive Gestaltung (Vermeidung von Masseanhäufung fern der Drehachse) erreicht werden.

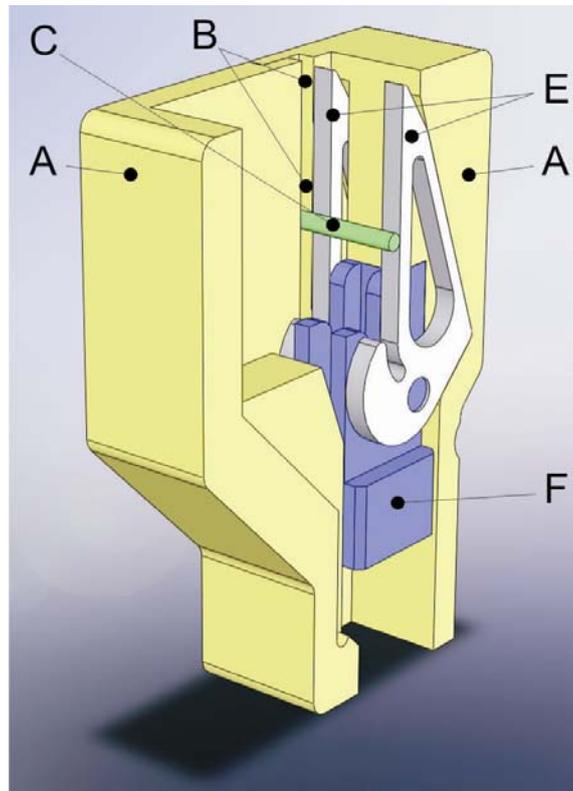


Abb. 4-32 Teiltransparente Schnittdarstellung der Entkopplungsbaugruppe mit einer Bezeichnung wichtiger Bauteile, Legende siehe Text

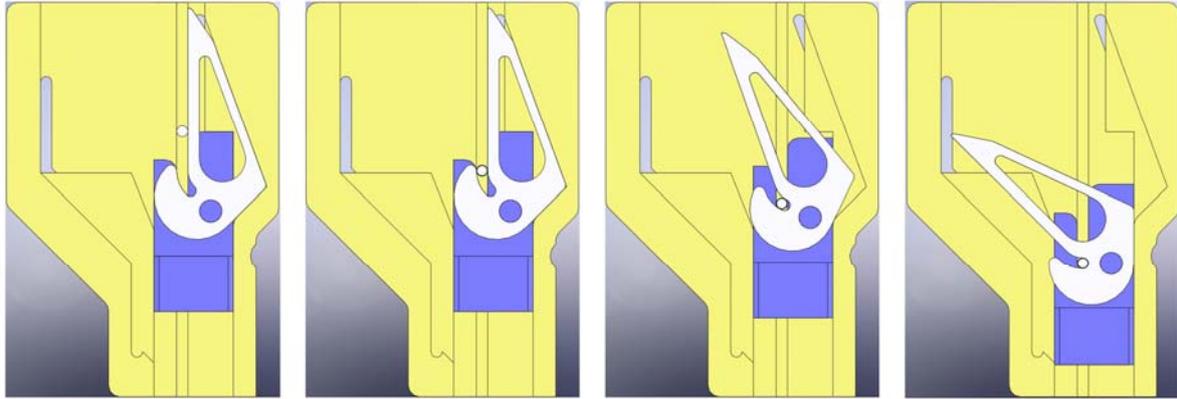


Abb. 4-33 Darstellung aufeinander folgender Phasen des Kopplungsvorgangs in Schnittdarstellung

Die Entkopplungsbaugruppe befindet sich in einem zusätzlichen zweiteiligen inneren Gehäuse (A) aus speziellem Gleitlager-Kunststoff, einem faserverstärkten PEEK. In einer Langnut (B) gleitet das aktorseitige Koppellement (C) des QKTs, ein quer zur Schubstange angeordneter und im Schubstangenaue gehaltenen Zylinderstift (nicht dargestellt). Solange sich das Koppellement (C) in der entkoppelten Phase befindet, verhindert es dabei gleichzeitig, dass die beiden Schwenkriegel (E) um ihre Drehachse schwenken können. Die Schwenkriegel verhindern ihrerseits in dieser Lage durch einen Formschluss mit dem Gehäuse (A), dass sich der Sekundär- oder Abtriebskolben (F) axial bewegt.

Gleitet nun das Koppellement (C) in Richtung des Abtriebskolbens (F) soweit, dass es in eine bogenförmige Nut in den Schwenkriegeln einmündet, so ist die Formschluss-Sperre aufgehoben und es entsteht zusätzlich ein Moment um deren Drehachse. Dadurch schwenken die Schwenkriegel (E) um (im Beispiel) maximal 45° und geben dabei den Abtriebskolben (F) durch ein Abrollen der Schwenkriegelnrückseiten auf dem Gehäuse (A) winklabhängig zunehmend frei. Es beginnt die gekoppelte Phase.

Wenn die Schwenkriegel (E) vollständig um 45° geschwenkt sind, ist der Abtriebskolben (F) formschlüssig über die Schwenkriegel mit dem Koppellement (C) verbunden und folgt dessen weiterer Bewegung. Setzt nach Erreichen des unteren Totpunkts die Rückholbewegung des Koppellements (C) durch den QKT ein, werden die Schwenkriegel (E) durch die Gehäuseführung in (A) solange am Zurückschwenken gehindert, bis sich der Abtriebskolben (F) wieder kurz vor seiner Ausgangslage befindet. Dann werden die Schwenkriegel (E) durch das Gehäuse (A) wieder zunehmend freigegeben und es beginnt das Zurückschwenken durch das bestehende Moment um die Drehachse, was zusätzlich die weitere Rückkehr des Abtriebskolbens (F) in seine Ausgangslage unterstützt. Nun befindet sich das Koppellement (C) wieder im entkoppelten Ausgangszustand und der Prozess wiederholt sich. Der Abtriebskolben überträgt nach außen die Stechbewegung auf eine Nadelanordnung oder auf ein vorgeschaltetes Stechmodul.

Wird der Abtriebskolben (F) derart konstruktiv gestaltet, dass die Nadelanordnung beim Ankoppeln eines Stechmoduls form- oder kraftschlüssig mit dem Abtriebskolben (F) verbunden ist, so kann die üblicherweise im Stechmodul vorhandene Rückstellfederkraft auf ein Minimum für eine definierte Ruhelage des abgekoppelten Moduls reduziert werden, wodurch der

QKT-Aktor weiter entlastet und der Verschleiß reduziert wird. Andererseits kann die Nadelanordnung bei hohen Beschleunigungen, festem Gewebewiderstand oder ab einer gewissen Stechfrequenz nicht vom Abtriebskolben abheben, was das Betriebsgeräusch deutlich verringert und eine definierte Nadelbewegung bedingt. Die Abbildung 4-34 zeigt ein Standard-Tätowiermodul mit einer flachen Neun-Nadel-Anordnung, das eine große Rückstellfederkraft aufweist, die von der elastischen Zugfederdichtung (nicht dargestellt) bereitgestellt wird.



Abb. 4-34 Standard-Tätowiermodul der Firma MT.DERM

Den fertig aufgebauten Prototyp 1 auf der Basis des QKTs, bei dessen Auslegung eine möglichst hohe Stechgeschwindigkeit und eine einfache Einstellung des Nadelherausstands durch das Drehen des Motorgehäuses im Vordergrund standen, zeigt die Abbildung 4-35 in einem Größenvergleich mit einer Ein-Cent-Münze. Das Gehäuse wurde aus Aluminium gefertigt, was eine hygienische Reinigung ermöglicht.



Abb. 4-35 Fertig aufgebauter Querkurbeltrieb-Aktor im Größenvergleich

Die komplexe, organisch gestaltete Form des Gehäuses lässt sich vereinfachen, wenn beispielsweise auf die Entkopplungsbaugruppe und / oder die Exzenter-Hebel-Getriebebaugruppe für eine integrierte Einstellung des Nadelherausstands verzichtet wird. Diese sind

raumfordernde Komponenten, die unter der Annahme eines bei begrenzter Frequenz aktiv applizierenden Stechgeräts, insbesondere für intrakutane Impfstoffapplikationen, mit integrierter manueller und später automatisierter Einstellmöglichkeit für den Nadelherausstand konzipiert wurden.

Das Prinzip des QKTs, insbesondere bestimmter Varianten, lässt sich, unabhängig von den oben genannten Baugruppen, für ein kosmetisches Pigmentiergerät adaptieren und ermöglicht es, in den Dimensionen eines klassischen Tätowiergeräts das im Vergleich zu klassischen Stechgeräten hoch dynamische Antriebskonzept zu realisieren.

Prototyp 2 (QKT-Redesign)

Probleme mit dem frühzeitigen Verschleiß bei Teilen der Antriebsmechanik, insbesondere dem Pleuel, und ein aktuelles Entwicklungsprojekt der Firma MT.DERM, bei dem der Nadelhub eines neuartigen Tätowiergeräts durch den Anwender einstellbar sein soll, motivierten eine Überarbeitung des Prototyps 1.

Es wurden Anforderungen für das Redesign erarbeitet, auf deren Grundlage die in der Abbildung 4-20 vorgestellten QKT-Varianten neu bewertet wurden: Hubeinstellung mit kompensiertem und einstellbarem Nadelherausstand bei hoher Stechgeschwindigkeit. Es wurde die besser geeignete QKT-Variante 5 gewählt, da hier die Hubeinstellung mit Kompensation gut umsetzbar ist. Beide QKT-Varianten sind in der Abbildung 4-36 einander gegenübergestellt.

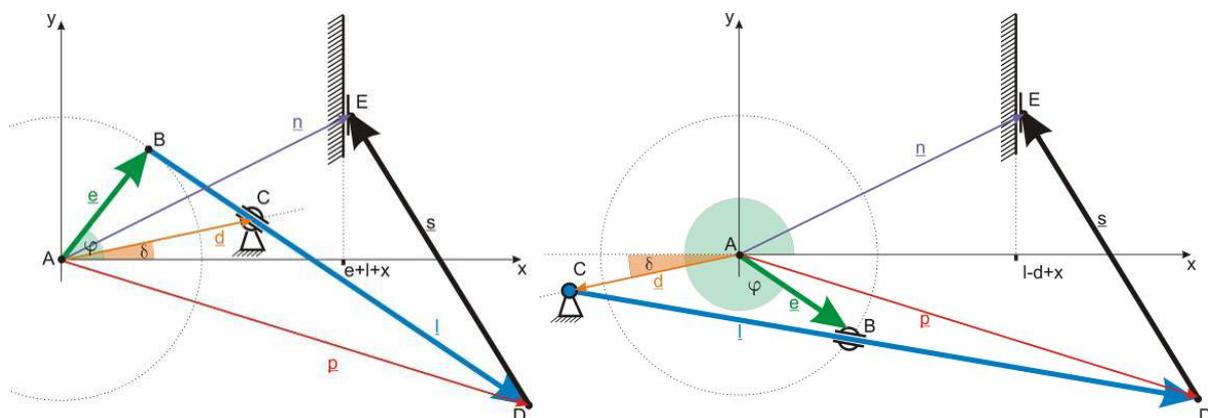


Abb. 4-36 Gegenüberstellung der Varianten 2 (links) und 5 (rechts)

Bei der Variante 5 werden im Vergleich zur Variante 2 die Rolle des Gleitstifts (C) und der Kurbel (B) vertauscht. Zusätzlich wurde zugunsten einer alternierenden Stechfrequenz (siehe weiter unten) ein Höhenwinkel $\delta = 90^\circ$ gewählt und auf den seitlichen Versatz $l - d + x$ (Variante 5) verzichtet, siehe die Abbildungen 4-36 und 4-37. Dies bewirkt, dass bei jeder 360° -Drehung der Kurbel (AB) der Pleuel (CD) eine Bewegung ähnlich einem Pendel ausführt und dabei das obere Pleuelauge (D) eine um die Mittellage symmetrische Kreisbogenbahn zweifach überstreicht. Dabei unterscheidet sich bei konstanter Motordrehzahl die maximale Geschwindigkeit der einen Pendelhalbperiode erheblich von der der anderen. Somit werden bei jeder Motordrehung zwei Stechbewegungen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und, daraus resultierend, mit alternierend wechselnder Stechfrequenz erzeugt. Dies verhindert beim

Stechen, dass die Haut als schwingfähiges System zu einer gleichlaufenden Schwingung angeregt wird.

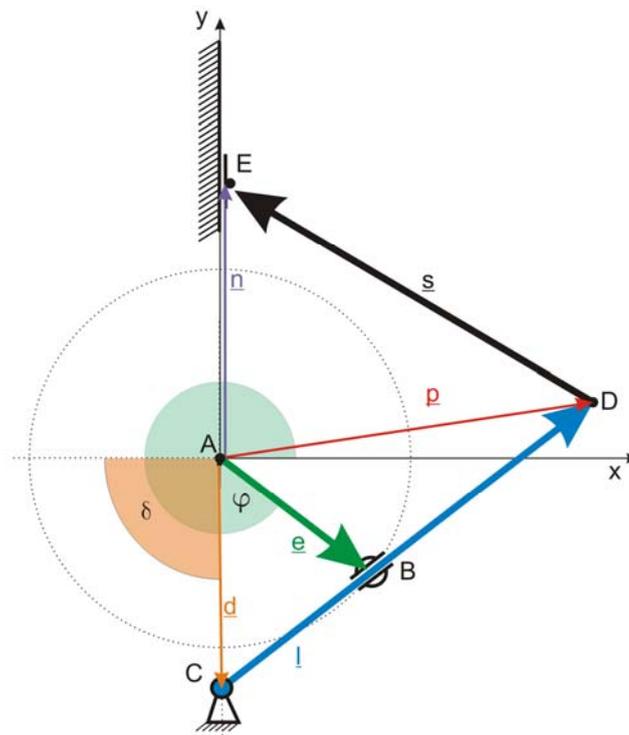


Abb. 4-37 Variante 5 in der für das Redesign modifizierten Form

Die Hubeinstellung wird bei dieser Gestaltungsvariante durch eine Veränderung des Abstands zwischen dem Pleueldrehpunkt (C) und der Motorwelle (A) realisiert, wodurch sich der von den durch (C) laufenden Tangenten an den Kurbelkreis eingeschlossene Winkel und damit die Lage des unteren (hinteren) Totpunkts des Nadelkolbens (E) ändern.

Anhand der Abbildung 4-38 wird die NHS-kompensierte Hubeinstellung erläutert, wobei die Verhältnisse in der Abbildung 4-37 um 90° rechtsläufig gedreht wurden. Dargestellt sind das Pleuel und die Schubstange in den Totpunkten der Stechbewegung für zwei Hubeinstellungen A (rot, obere Bildhälfte) und B (schwarz, untere Bildhälfte). Im Fall A ist der Pleuelstift-Abstand (PSA) zur Motorwelle größer als im Fall B, wodurch der bei einer vollständigen Pleuelschwingung durch die Tangenten aufgespannte Winkel und der Hub der Nadelbewegung kleiner sind und umgekehrt. Vorteilhaft bei der dargestellten Gestaltungsvariante für die Hubeinstellung mit dabei in festem Abstand mitbewegter Gehäusespitze ist, dass der Abstand zwischen dem Pleueldrehpunkt und dem oberen (vorderen) Totpunkt unabhängig vom eingestellten Hub bleibt, sodass der vom Anwender gewählte Nadelherausstand (NHS) und damit die theoretisch mögliche Stechtiefe unverändert bleiben und keiner weiteren Ausgleichsmechanik bedarf.

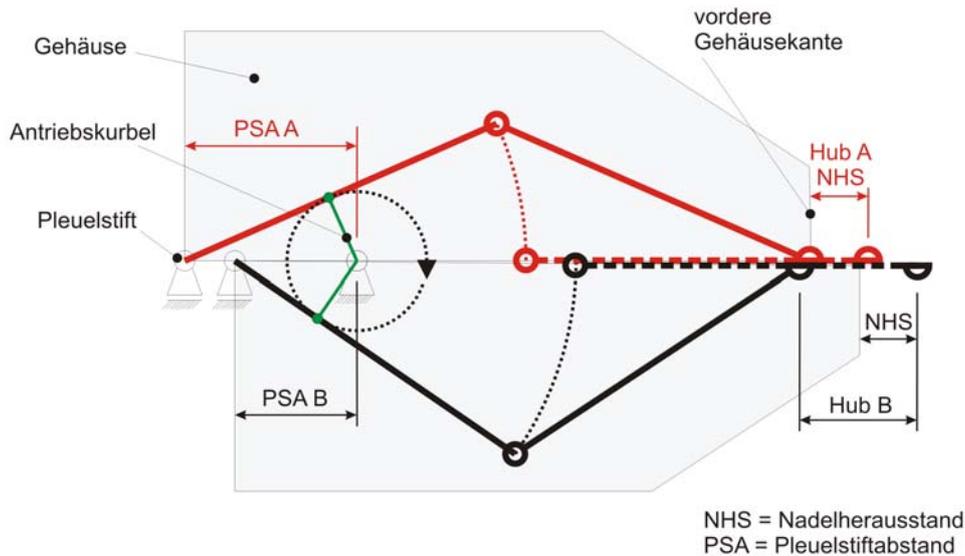


Abb. 4-38 Schematische Darstellung des Prinzips der Hubeinstellung bei der modifizierten Variante 5 des QKTs

Für die analytische Ermittlung des Hubs in Abhängigkeit vom Pleuelstiftabstand (PSA) betrachte man die Abbildung 4-39. Diese zeigt die Verhältnisse für den vorderen (E') und hinteren (E) Totpunkt der Nadel. Die Kurbel e rotiert um den Punkt B, der Pleuel dreht um den Stellstift A.

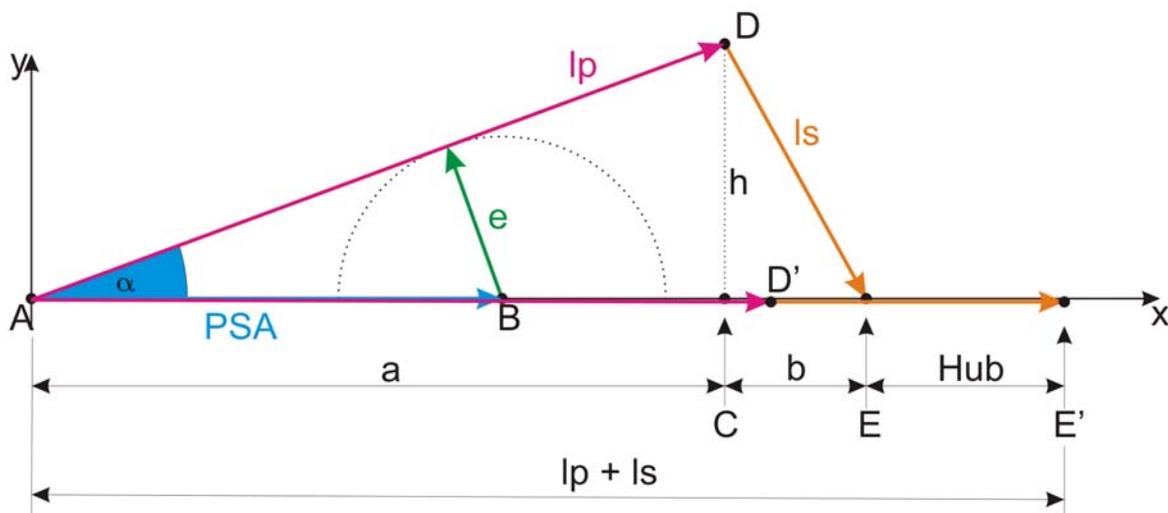


Abb. 4-39 Schematische Darstellung der geometrischen Verhältnisse für die analytische Berechnung der Hub-PSA-Funktion.

Dabei kann für das System im hinteren Totpunkt E über den Strecken AB und AC ein rechtwinkliges Dreieck mit einem gemeinsamen Innenwinkel α aufgespannt werden, sodass gilt:

$$\sin(\alpha) = \frac{e}{PSA} = \frac{h}{l_p} \quad (4-30)$$

Daraus ergibt sich h zu

$$h = \frac{l_p \cdot e}{PSA} \quad (4-31)$$

Des Weiteren erhält man für die Summe der Strecken a (= AC) und b (=CE) unter Anwendung des Satzes des Pythagoras folgende Beziehung:

$$a + b = \underbrace{\sqrt{l_p^2 - h^2}}_{=a} + \underbrace{\sqrt{l_s^2 - h^2}}_{=b} \quad (4-32)$$

Dabei ist l_p die Länge des Pleuels, h die Höhe und l_s die Länge der Schubstange. Wird (4-31) in (4-32) eingesetzt, so kann für die konstruktiv festgelegten Größen e, l_p und l_s eine Abhängigkeit des Hubs von der veränderlichen Größe PSA angegeben werden.

$$\text{Hub} = f(PSA) = l_p + l_s - (a + b) \quad (4-33)$$

$$\text{Hub} = f(PSA) = l_p + l_s - \underbrace{\sqrt{l_p^2 - \left(\frac{l_p \cdot e}{PSA}\right)^2}}_a - \underbrace{\sqrt{l_s^2 - \left(\frac{l_p \cdot e}{PSA}\right)^2}}_b \quad (4-34)$$

Für den Prototyp 2 wurde ein Kurbelkreisradius $e = 2$ mm, eine Pleuellänge $l_p = 15$ mm und für die Schubstange eine Länge $l_s = 11$ mm gewählt. Die Abbildung 4-40 zeigt den inneren Aufbau des Prototyps 2 als CAD-Schnittansicht.

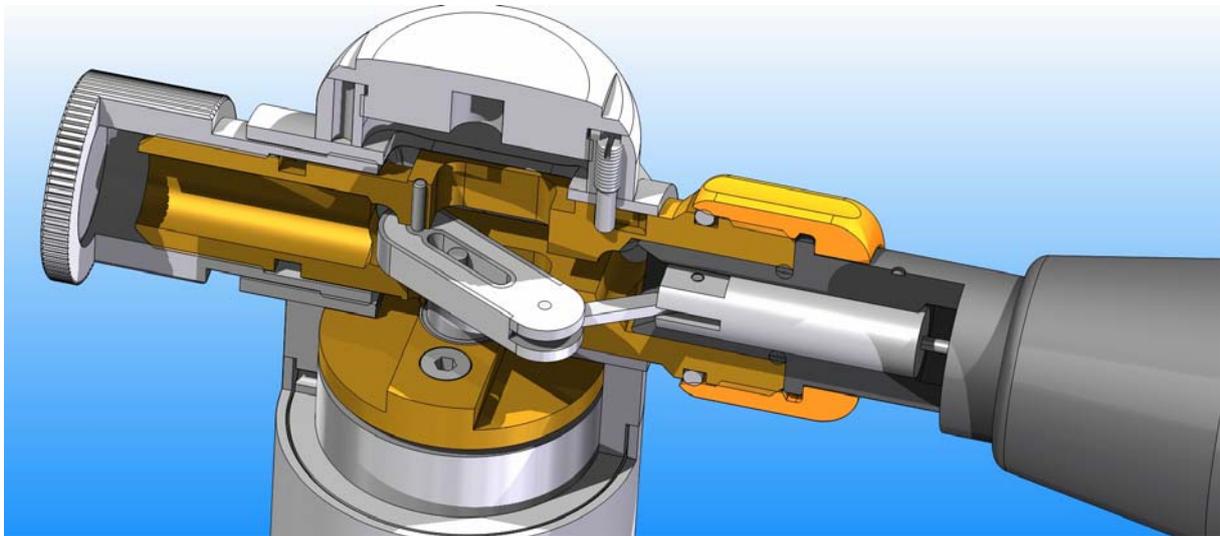
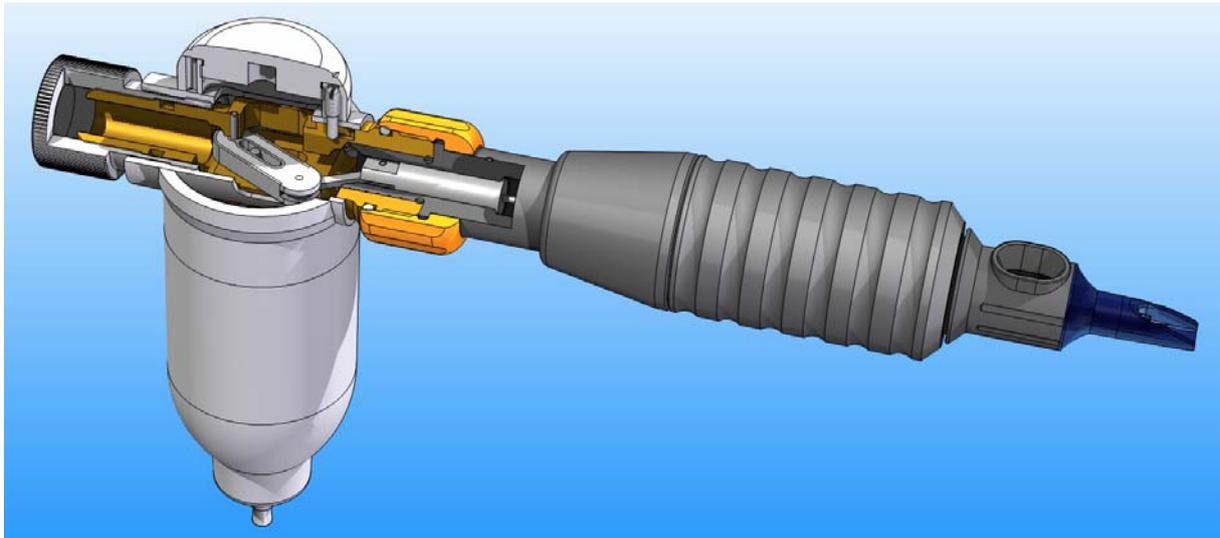


Abb. 4-40 CAD-Bild des Prototyp 2 (Motorisierung FH 2232, siehe Text) in teilgeschnittener Darstellung, oben Gesamtansicht, unten Detailansicht des inneren Aufbaus

Der PSA lässt sich dabei mittels einer Rändelmutter über ein doppelt wirkendes Stellgewinde, ein so genanntes Differentialgewinde, auf einem 2 mm-Bereich [4,1 mm; 6,1 mm] hoch aufgelöst verändern. Dies wird durch ein Außenfeingewinde (RH) der Steigung 0,75 mm und ein Innenfeingewinde (RH) der Steigung 0,5 mm auf demselben Schaft der Rändelmutter realisiert. So wird die Rändelmutter für eine volle Drehung im Uhrzeigersinn um 0,75 mm weiter ins Gehäuse verlagert, gleichzeitig wird der drehfeste und axial verschiebbliche Pleuelstiftträger um 0,5 mm tiefer in das Innere der Rändelmutter und damit in entgegengesetzter Richtung verschoben, sodass der PSA bei diesem Beispiel effektiv um 0,25 mm verringert wird. Damit ergibt sich eine Auflösung von acht Umdrehungen für die Einstellung des Hubs. Der Hub kann nach (4-34) für das angegebene PSA-Intervall Werte zwischen 1,99 mm und 4,5 mm annehmen. Der PSA ist wegen der konstanten effektiven Steigung von der Anzahl der Umdrehungen der Rändelmutter linear abhängig. Für den Prototyp 2 zeigt die Abbildung 4-41 die funktionelle Abhängigkeit des Hubs vom Pleuelstiftabstand PSA, bzw. von der Anzahl der Umdrehungen der Rändelmutter.

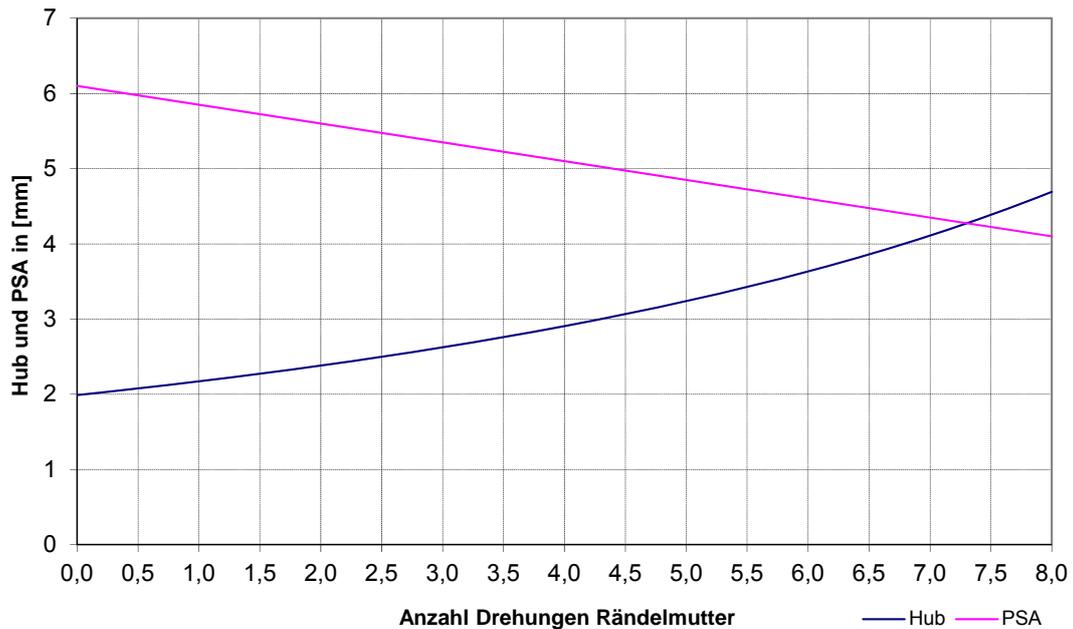


Abb. 4-41 Abhängigkeit des Hubs und des Pleuelstiftabstand PSA von der Anzahl der Drehungen der Rändelmutter

Die Abbildung 4-42 zeigt den Prototyp 2 mit drei unterschiedlichen Motorisierungen. Für die drei Aktoren wurden DC-Bürstenmotoren der Firma Faulhaber, rechts ein FH1724 (Edelmetallbürsten-Kommutierung, 9V), in der Mitte ein FH1727 (Kohlebürsten-K., 6V) und links ein FH2232 (Edelmetall-K., 12V) verwendet. Der Aktor rechts wies bereits für eine mittlere Hubeinstellung keine ausreichende Leistungsreserve auf, um bei einer Last, zum Beispiel einem marktüblichen Tätowiermodul, trotz höherer elektrischer Spannung, anzulaufen. Beim mittleren Motor versagte aufgrund der hohen Belastung und der weniger belastbaren Kommutierung der Motor bereits nach kurzer Betriebszeit. Das linke Gerät wies eine genügende Leistungsreserve und Anlaufsicherheit auf und konnte im praktischen Versuch getestet werden, siehe unten.



Abb. 4-42 Der Prototyp 2 (QKT-Redesign) mit einer integrierten Hubeinstellung in verschiedenen Motorisierungsvarianten, siehe Text

Das Weg-Zeit-Verhalten des linken Geräts wurde mit einem zeitlich hoch auflösenden Laser-Triangulationssensor bei einer festen Betriebsspannung von 9 V für jede halbe Drehung der Rändelmutter untersucht. Dabei diente ein modifiziertes Modul mit geringer Elastomer-Federsteifigkeit als Einstechlast, bei dem die Nadel durch einen Stahldraht ersetzt und an dessen freiem Ende eine Öse angeformt sowie ein Papierstanzteil als Streulicht-Reflexionsfläche fixiert wurde.



Abb. 4-43 Modifiziertes Modul für die Messungen mit dem Lasertriangulationssensor

Aus den Weg-Zeit-Messwerten wurde mittels diskreter Differentiation die Geschwindigkeits-Zeit-Beziehung errechnet und mit den Weg-Zeit-Messwerten eine Geschwindigkeits-Weg-Abhängigkeit abgeleitet, die in der Abbildung 4-45 dargestellt ist, wobei eine negative Geschwindigkeit der Einstechbewegung zugeordnet wird (Umlauf im Uhrzeigersinn). Theoretisch müssen, wie in der Abbildung 4-44, die vorderen Totpunkte der beiden Stechzyklen jeder Periode aufeinander zu liegen kommen, was bei den Messkurven nicht der Fall ist. Ursächlich dafür sind vor allem ein fertigungsbedingter seitlicher Versatz der Pleuelstiftlage (Schränkung) sowie ein seitliches Spiel der Motorwelle aufgrund von frühzeitigem Verschleiß des vorderen Motorlagers. Letzteres wurde durch einen zusätzlich an der Motorstirnfläche angebrachten Flansch mit einem Radialkugellager der Firma GRW vermindert. Durch die bestehenden Abweichungen und das Restspiel in allen gelenkigen Verbindungen des Antriebsstrangs weicht die gemessene Stößelbewegung von der Idealform ab, vgl. die Abbildungen 4-44 und 4-45.

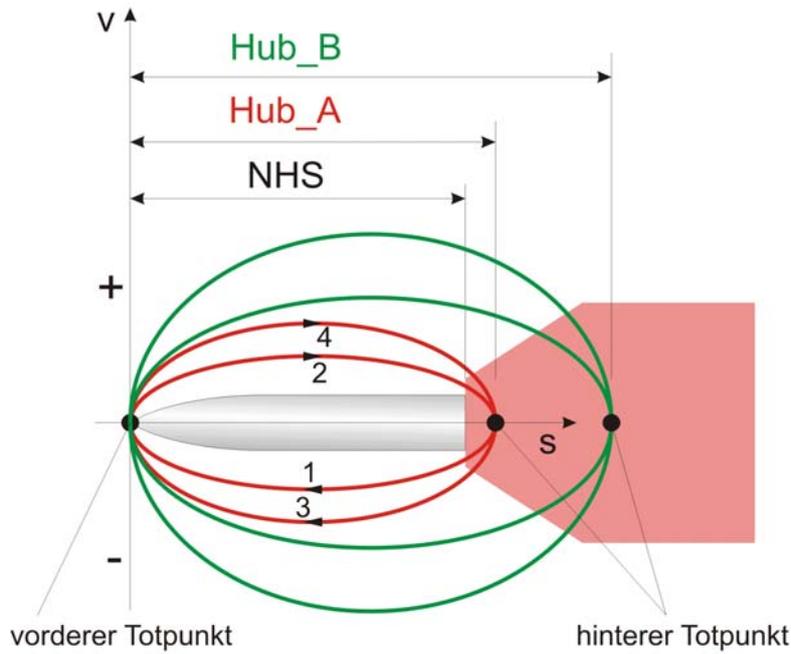


Abb. 4-44 Auf den vorderen Totpunkt bezogene Geschwindigkeits-Weg-Funktionen für die Nadel bei unterschiedlichem Hub (Fall A, B) und festem maximalem Nadelherausstand (NHS)

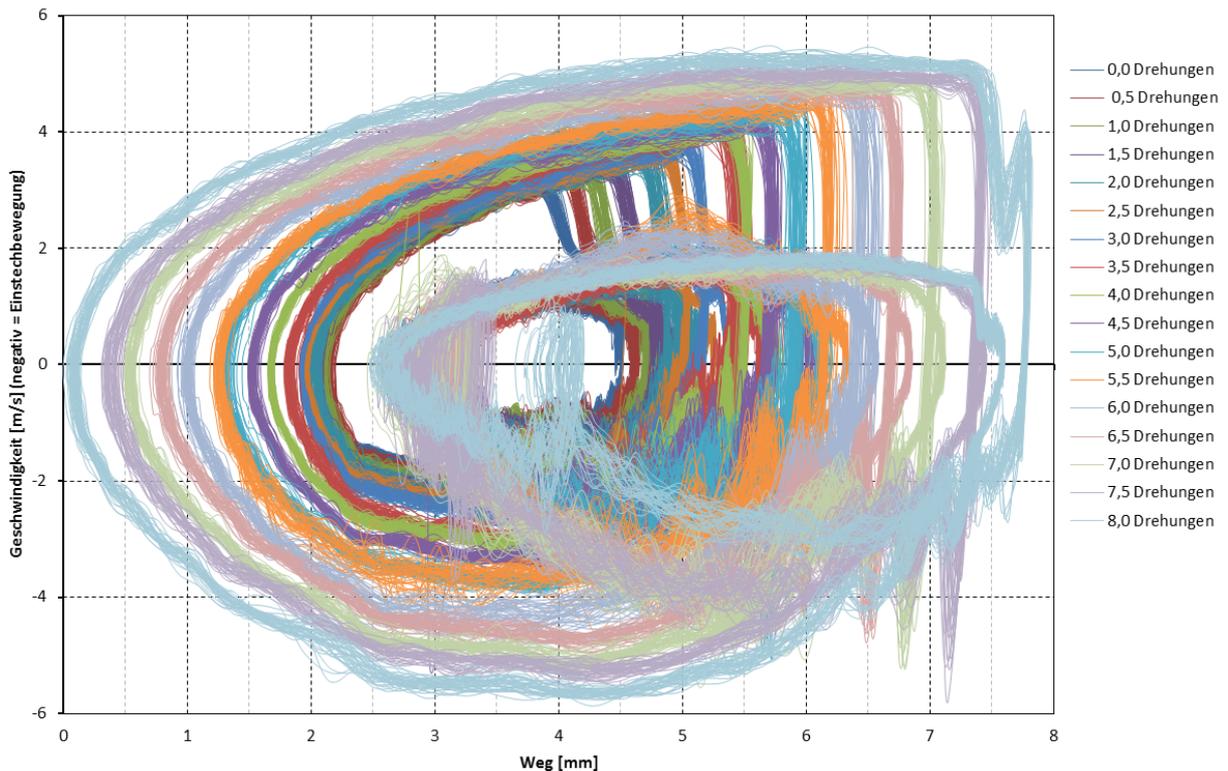


Abb. 4-45 Geschwindigkeits-Weg-Funktion des Prototyp 2, bezogen auf den maximalen Nadelherausstand

Man erkennt für eine Hubeinstellung größer als 2,8 mm bzw. für mehr als 3,5 Drehungen der Rändelmutter anhand der zunehmenden Verlagerung des vorderen Totpunkts, dass das Gerät in der schnellen Stechhalbperiode derart hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten aufweist, dass der Modulstößel vom Antriebsstößel des Geräts abhebt. Die derzeit von der

Firma MT.DERM vertriebenen Tätowiermodule besitzen eine Elastomerfeder mit höherer Federsteifigkeit als die im Messmodul verwendete. Insofern wird der Effekt in der Praxis nicht erwartet. Dennoch muss dies bei der zukünftigen Gestaltung der Produktgruppe, insbesondere des Verbrauchsmaterials, berücksichtigt werden. Zudem bewirkt eine hohe Geschwindigkeit deutlich höhere Belastungen für das Elastomermaterial durch innere Reibung und dabei in Wärme umgewandelte Energie.

Der Prototyp 2 konnte an freiwilligen Probanden hinsichtlich seiner Eignung als Pigmentiergerät getestet werden, wobei mit einer mittleren Position der Rändelmutter (Hub je nach Stechphase ca. 3,0 und 3,8 mm) bei einer Spannung von 12 V gearbeitet wurde, siehe Abbildung 4-46. Hierbei zeigte sich anhand der deutlich höheren Arbeitsgeschwindigkeit des Tätowierers sowie gemäß dessen persönlichen Eindrucks, dass gegenüber einer herkömmlichen Tätowiermaschine ein deutlich verbesserter und „direkter“ Farbeintrag in die Haut erhalten wurde. Dies bedeutet, dass der Tätowiervorgang, vorzugsweise bei linienförmigen Motivelementen, wesentlich schneller erfolgen kann. Diese Maschine ist daher besonders für erfahrene Tätowierer mit sicherer Handführung geeignet. Aufgrund der verbesserten Gerätedynamik kann eine angepasste Arbeitsmethode eines professionellen Anwenders sinnvoll sein.



Abb. 4-46 Praktische Versuche mit dem QKT-Redesign

4.1.5 Stechgeschwindigkeits-Aktorkonzept 4: Federaktoren

Die Forderung nach möglichst hoher Stechgeschwindigkeit legt die Verwendung einer Feder als in den Antriebsstrang geschalteten zeitlichen Energiespeicher nahe, welcher zum gewünschten Zeitpunkt sprunghaft entladen wird. Dabei ist denkbar, dass die vom treibenden System periodisch mit bestimmtem zeitlichen Verlauf abgegebene mechanische Energie mit gleicher Frequenz, verändertem Verlauf und Phasenversatz vom Federspeicher auf das Stech-

system übertragen wird. Denkbar ist auch, dass eine Untersetzung der Antriebs- auf die Abtriebsfrequenz durch die kumulative Speicherung mehrerer Ladezyklen erfolgt.

Ein wesentlicher Vorteil der Federaktoren gegenüber den bisher am Stechgerätemarkt eingesetzten, elektromotorisch getriebenen Aktoren liegt in einer von der Arbeitsfrequenz unabhängigen, hohen Stechgeschwindigkeit. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn eine geringe Stechfrequenz oder auch eine Einzelstichfolge gefordert wird, z.B. bei der Mesotherapie oder bei medizinischen Applikationen, wie der Haarfollikeltransplantation.

Ein Federaktor kann einen oder zwei, eventuell auch mehr Federspeicher aufweisen, sodass der Sprung bei der Stechbewegung und / oder bei der Rückholbewegung ausgeführt wird. Als Federspeicher kommen vor allem Druck- und Zugfedern, Spiralfedern oder Biegebalkenfedern in Betracht.

Sprungaktor-Demonstrator

Es wurde ein als Sprungaktor bezeichneter, bidirektional wirkender Federaktor mit zwei Zugfeder-Energiespeichern als Demonstrator aufgebaut und untersucht. Ziel war es, ein Stechgerät zu entwickeln, welches sowohl die Stech- als auch die Rückholbewegung (bidirektional) sprunghaft und bezüglich der Stechgeschwindigkeit unabhängig von der Antriebsfrequenz ausführt, was durch eine phasenverschobene Parallelschaltung zweier Steuerkurven realisiert wurde. Für die Abbildung, bzw. Programmierung der Steuerkurven wurden verschiedene Konzepte entwickelt und untersucht. Die Dauer der Dosierphase nach dem Einstechvorgang wird von der Phasenverschiebung zwischen den Sprungklippen in den beiden Steuerkurven und der Drehzahl bestimmt. Prinzipiell können die Steuerkurven auf zwei getrennten oder auf einem Bauteil abgebildet werden. Zu beachten sind dabei unter anderem der vorhandene Bauraum, die geforderte Stechgerätausführung als gewinkeltes oder gerades Handgerät sowie konstruktive Aspekte, wie die Relativgeschwindigkeiten zwischen aufeinander gleitenden Bauteilen, das benötigte Antriebsmoment oder der maximale Anstieg der Steuerkurve.

Da eine unbegrenzte Anzahl von regelmäßig aufeinander folgenden Stechbewegungen gefordert wurde, kam als Kulisse eine endlose (geschlossene) Steuerkurvenabbildung auf einem rotierenden Bauteil in Betracht. Man betrachte die Abbildung 4-47. Liegt die Stechachse parallel zur Antriebsachse, können die Steuerkurven auf einer Walzenmantelfläche (rote Kurve) in radialer Richtung als Nut oder Nocke, dagegen bei orthogonal zur Antriebsachse angeordneter Stechachse auf einer Zylinderdeckfläche (grüne Kurve) in axialer Richtung als Nut oder als Randkontur ausgebildet sein.

Für den Demonstrator wurden die Steuerkurven als Randkontur in zwei getrennte Bauteile programmiert, sodass eine Einstellung des Phasenwinkels auch nach der Montage des Demonstrators möglich ist.

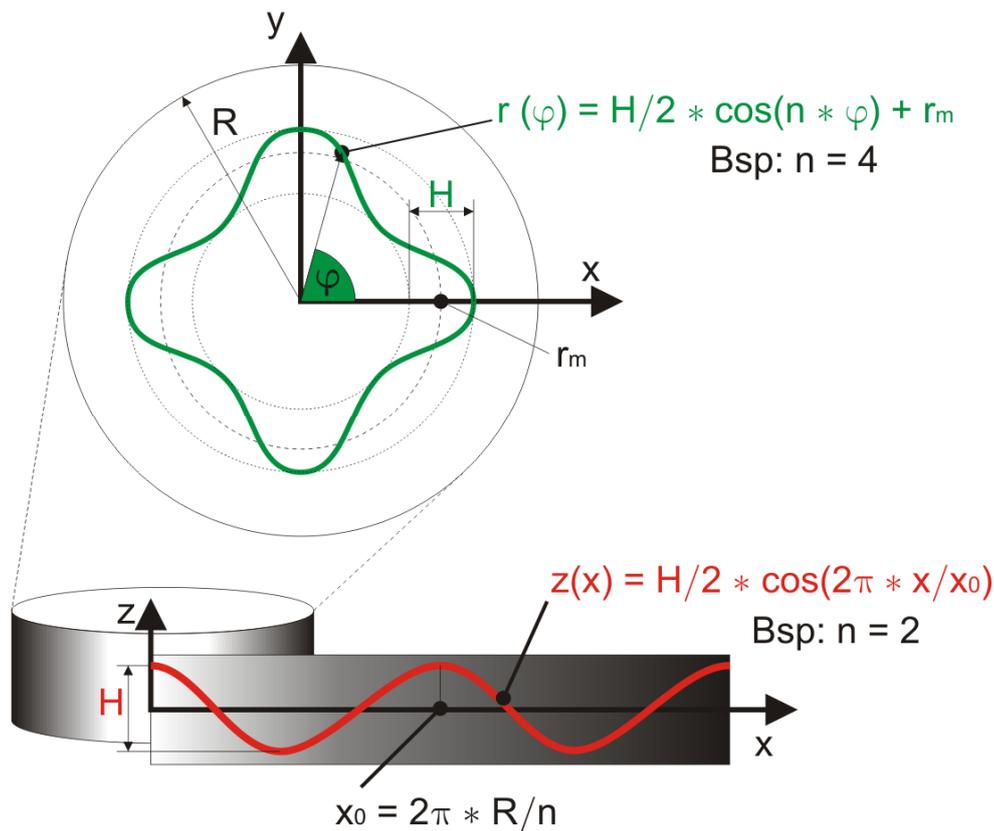


Abb. 4-47 Zwei Möglichkeiten der Abbildung einer Steuerkurve auf einem zylindrischen Bauteil

In der Abbildung 4-48 wird ein Beispiel für das Grundprinzip der Bewegungsabfolge des Sprungaktors für eine Variante dargestellt, bei der die Steuerkurven auf einem Zylindermantel als Nut abgebildet wurden. Für den Aufbau des Demonstrators wurden die Steuerkurven auf zwei Kurvenscheiben als Randkontur abgebildet. Das dargestellte Grundprinzip kann sinngemäß übertragen werden. Die obere Bildreihe stellt den Stechvorgang, die untere den Rückholvorgang dar. Die darin durchscheinend rot dargestellte Steuerkurvenscheibe weist am oberen und unteren Rand die Spann- und Steuerkurven auf. In der ebenen Darstellung scheint sie bei ihrer Drehung horizontal von rechts nach links durch die Bilder zu wandern. Der Stechkolben, welcher die nach unten gerichtete Nadel trägt, ist grün, der Rückholkolben violett dargestellt. Die Hautauflage ist Teil des Gehäuses und wird grau symbolisiert. Beide Kolben weisen eine durch einen kleinen Kreis symbolisierte Abtastnocke auf. Mittels dieser wird die Form der Steuerkurven in eine axiale Verschiebung der Kolben umgesetzt.

Zwischen dem Gehäuse und dem Rückholkolben befindet sich bei der dargestellten Variante eine vorgespannte Druck-, zwischen dem Stech- und dem Rückholkolben eine vorgespannte Zugfeder. Beide Kolben sind nur in senkrechter Richtung verschiebbar angeordnet. Die zwei Steuerkurven haben unterschiedliche Aufgaben. Die Stechkurve (obere Kontur) sorgt dafür, dass der Nadelkolben axial erst an der entsprechenden Klippe der Kurve freigegeben wird. Die Druckkurve (untere Kontur) bewirkt, dass durch eine Verlagerung des Rückholkolbens die Kraft auf den Stechkolben durch die Dehnung der zwischen beiden angeordneten Zugfeder steigt. Gleichzeitig steigt in der Darstellung die Rückstellkraft durch die zunehmend komprimierte Druckfeder zwischen Gehäuse und Rückholkolben.

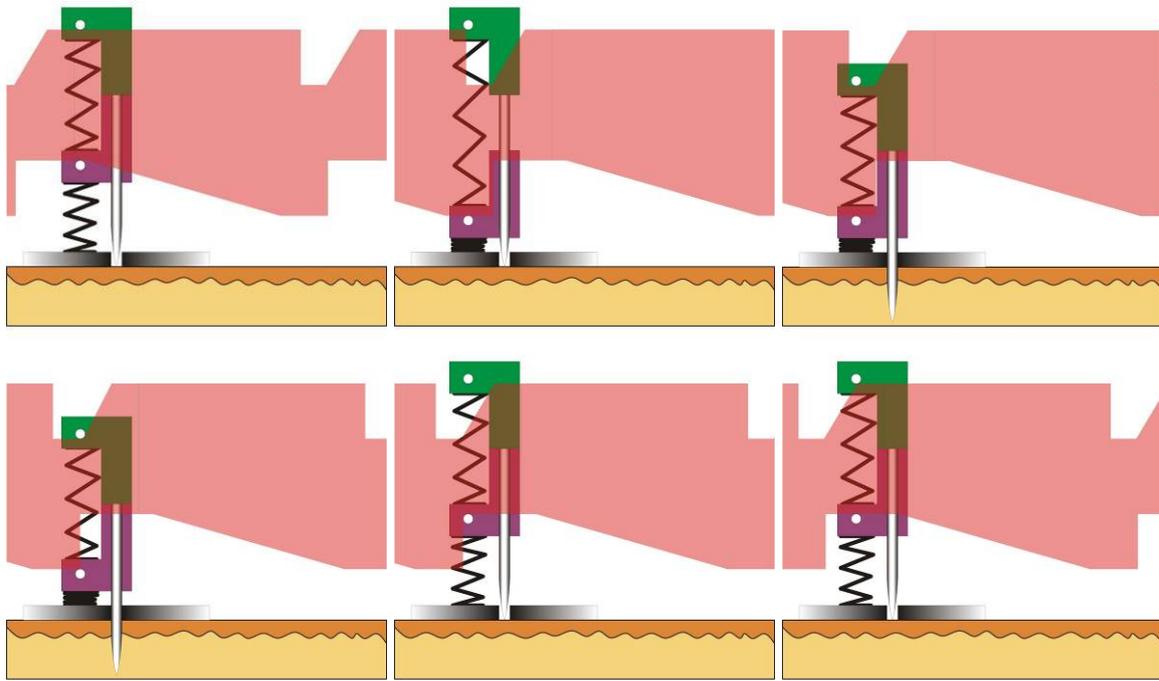


Abb. 4-48 Arbeitsweise des Sprungaktors, oben Einstech-, unten Rückholvorgang

Wird der Stechkolben freigegeben, beschleunigt er stark und prallt gegen den Anschlag am Rückholkolben. Zusätzlich existiert auf gleicher Höhe ein Gehäuseanschlag (hier nicht dargestellt), der ein weiteres Vordringen des Stechkolbens verhindert. Damit wirkt nach außen nur noch die Druckkraft auf den Rückholkolben. Wird dieser seinerseits durch die Klippe in der Druckkurve freigegeben, springt er in seine Ausgangslage zurück und befördert damit ebenfalls den Stechkolben in dessen Ausgangslage. Abschließend „verriegelt“ die Stechkurve die axiale Verschiebbarkeit des Nadelkolbens in Stechrichtung, bevor die Druckkurve ansteigt und der Vorgang erneut beginnt.

Beim als gewinkeltes Handstück aufgebauten Demonstrator wurden die beiden Steuerkurven als Randkontur in 4 mm tiefe Kunststoffscheiben aus PEEK, Ausgangsdurchmesser 20 mm, realisiert und auf einer durchgehenden Welle aus Messing montiert, die sowohl manuell als auch elektromotorisch angetrieben werden kann. Als Feder wurde ein elastisches Silikon-gummiband verwendet. Der Abgriff erfolgte über jeweils einen auf dem Umfang der Steuer-scheibe gleitenden Zylinderstift, der zusätzlich in einer Gehäusenut geführt wurde.



Abb. 4-49 Einzelteile des Sprungaktor-Demonstrators vor der Montage

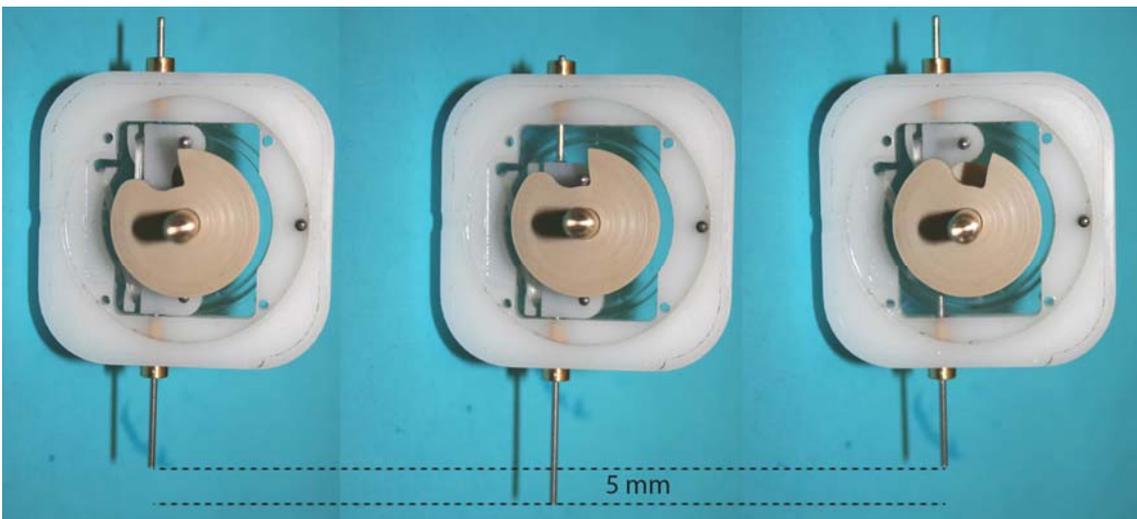


Abb. 4-50 Funktionsphasen beim teilmontierten Sprungaktor-Demonstrator, Kurvenscheibe dreht im UZS: Links vor und Mitte nach der Stech-, rechts nach der Rückholbewegung

Wie in der Abbildung 4-51 zu erkennen, wurde am Demonstrator ein LUER-Lock®-Adapter befestigt, um Stechversuche mit Kanülen durchzuführen. Hierzu diente der elektromotorisch angetriebene Demonstrator mit einer 30G-Kanüle, Durchmesser 0,3 mm, wobei die Stechvorgänge mit einer Highspeed-Videokamera dokumentiert und anschließend ausgewertet wurden.

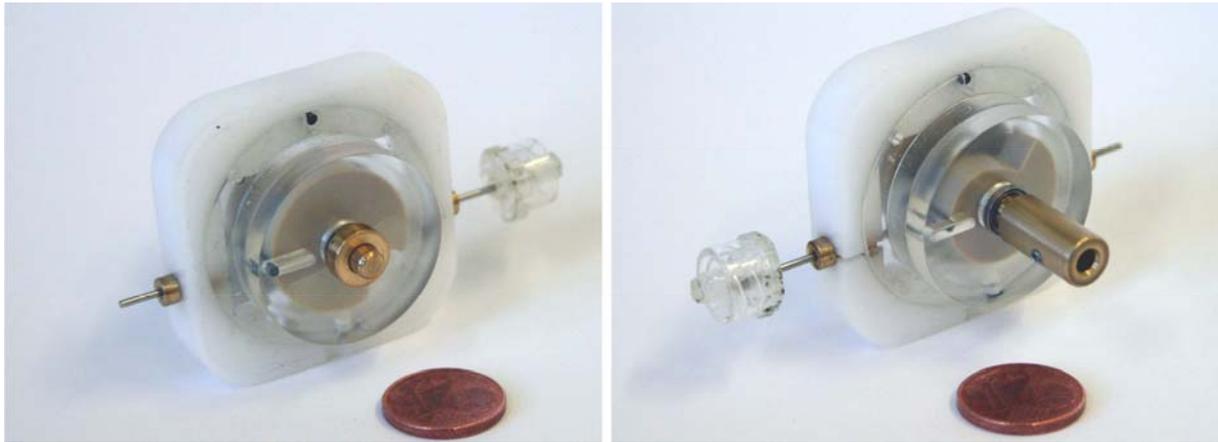
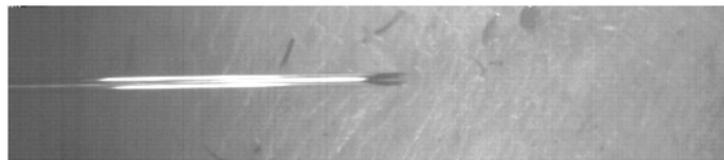


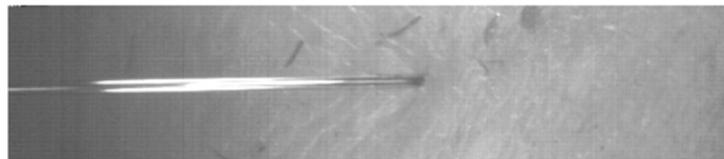
Abb. 4-51 Montierter Sprungaktor-Demonstrator im Größenvergleich zu einer Ein-Cent-Münze



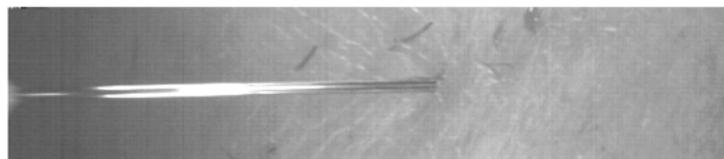
15.11.2010 10:38:55 18211 4278,2[ms] 560x120, 4256 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



15.11.2010 10:38:55 18213 4278,6[ms] 560x120, 4256 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



15.11.2010 10:38:55 18215 4279,1[ms] 560x120, 4256 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



15.11.2010 10:38:55 18217 4279,6[ms] 560x120, 4256 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33

Abb. 4-52 Videostandbilder eines Stechvorgangs in unvorspannte Haut, Kanüledurchmesser 0,3 mm, Länge 12mm (30G x 1/2“), Dauer ca. 1,4 ms, Nadelhub ca. 5 mm

Wie man in der Abbildung 4-52 erkennt, zeigt sich auch bei unvorspannter Haut ein deutlich vermindertes Hautausweichen bei hohen Stechgeschwindigkeiten gegenüber langsamen Stechaktoren. Zu erkennen ist dies beispielsweise im zweiten Standbild von oben am partiellen Eindringen der Kanülenspitze sowie am bereits vollständigen Eindringen des Kanülenau-

ges im unteren Bild nach nur wenigen zehntel Millimetern. Grafisch ließ sich anhand der Bilder eine Einstechgeschwindigkeit von etwa 3 m / s ermitteln.

Die Geschwindigkeit ist abhängig von der Wahl der mechanischen Feder, insbesondere von deren Federsteifigkeit, Ruhelänge und Vorspannung in Einbaulage, der Sprunghöhe bzw. dem Nadelhub und den während der Stech- und Rückholbewegung am Stechapparat auftretenden Reibkräften. Die Geschwindigkeit lässt sich, ausgehend vom zweiten Newton'schen Axiom, herleiten:

$$\dot{\vec{p}} = \frac{d}{dt}(m \cdot \vec{v}) = \sum \vec{F} \quad (4-35)$$

Bei zeitlich konstanter Stößelmasse m vereinfacht sich die Formel zu:

$$m \cdot \frac{d}{dt}(\vec{v}) = m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F} \quad (4-36)$$

Die einfache Integration liefert einen Zusammenhang zwischen der Zeit und der Geschwindigkeit:

$$v(t) = \int_{t=0}^{t_1} \frac{F(x)}{m} \cdot dt = \frac{F(x(t))}{m} \cdot t + \underbrace{v_0}_{=0} \quad (4-37)$$

Wird für die Summe aller angreifenden Kraftvektoren lediglich eine, in Bewegungsrichtung am Stößel angreifende Kraft $F(x)$ angenommen, lässt sich, ausgehend von einer quasistatischen Ausgangslage $x = 0$, der Ausdruck (4-37) weiter umformen und schreiben:

$$x(t) = \int_{t=0}^{t_1} \left(\int_{t=0}^{t_1} \frac{F(x)}{m} \cdot dt \right) \cdot dt = \frac{F[x(t)]}{2 \cdot m} \cdot t^2 + \underbrace{v_0 \cdot t + x_0}_{=0} \quad (4-38)$$

Die mechanische Feder sei eine bei $x = 0$ vorgespannte Hooke'sche Feder mit der Federsteifigkeit c und der Vorspannkraft F_0 . Der Zusammenhang zwischen der Federkraft $F(x)$ und dem Weg der Nadel x während der Stechbewegung lässt sich als lineare Funktion mit einer Vorspannkraft F_0 für $x = 0$ und einem wegabhängigen reduzierenden Term $- c \cdot x$ schreiben:

$$F[x(t)] = F_0 - c \cdot x(t) \quad (4-39)$$

Setzt man (4-39) in (4-38) ein, erhält man:

$$x(t) = \frac{F_0 - c \cdot x(t)}{2 \cdot m} \cdot t^2 = \frac{F_0}{2 \cdot m} \cdot t^2 - \frac{c}{2 \cdot m} \cdot x(t) \cdot t^2 \quad (4-40)$$

Die genaue Lösung von (4-40) kann numerisch ermittelt werden. Die maximal erreichbare Geschwindigkeit lässt sich abschätzen, wenn einerseits die Federkraft wegunabhängig angenommen und damit der zweite Term in (4-40) zu Null gesetzt wird, und andererseits der zur Verfügung stehende Hub x , die Vorspannkraft F_0 und die Stößelmasse m bekannt sind. Löst man (4-40) nach der minimal möglichen Dauer des Einstechvorgangs t_{\min} auf und setzt in (4-37) ein, erhält man:

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot x}{F_0}} \quad (4-41)$$

$$v(t_{\min}) = \frac{F_0}{m} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot x}{F_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_0 \cdot x}{m}} \quad (4-42)$$

Der geforderte Hub beträgt beim Demonstrator $x = 5 \text{ mm}$, die Stößelmasse wird mit $m = 3 \text{ g}$ und die Vorspannkraft mit $F_0 = 3 \text{ N}$ angenommen. Man erhält eine maximale Geschwindigkeit von etwa $3,2 \text{ m/s}$.

$$v(t_{\min}) = \sqrt{\frac{2 \cdot (3\text{N}) \cdot (5\text{mm})}{(3\text{g})}} \approx 3,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4-43)$$

Das Ergebnis einer zeitlich hoch aufgelösten Weg-Messung mit einem Laser-Triangulations-sensor am fertig aufgebauten Demonstrator zeigt die Abbildung 4-53. Es wurden der Weg (blaue Kurve) sowie die daraus ermittelte Geschwindigkeit (magentafarbene Kurve) über der Zeit aufgetragen, wobei negative Geschwindigkeiten der Stechbewegung und positive der Rückholbewegung zuzuordnen sind. Der Weg wurde auf den vorderen Totpunkt der Stechbewegung, also den maximalen Nadelherausstand, bezogen.

Mit der Messung konnte die anhand des Highspeed-Videos ermittelte maximale Stechgeschwindigkeit von 3 m / s etwa 1 mm vor dem vorderen Totpunkt bestätigt werden.

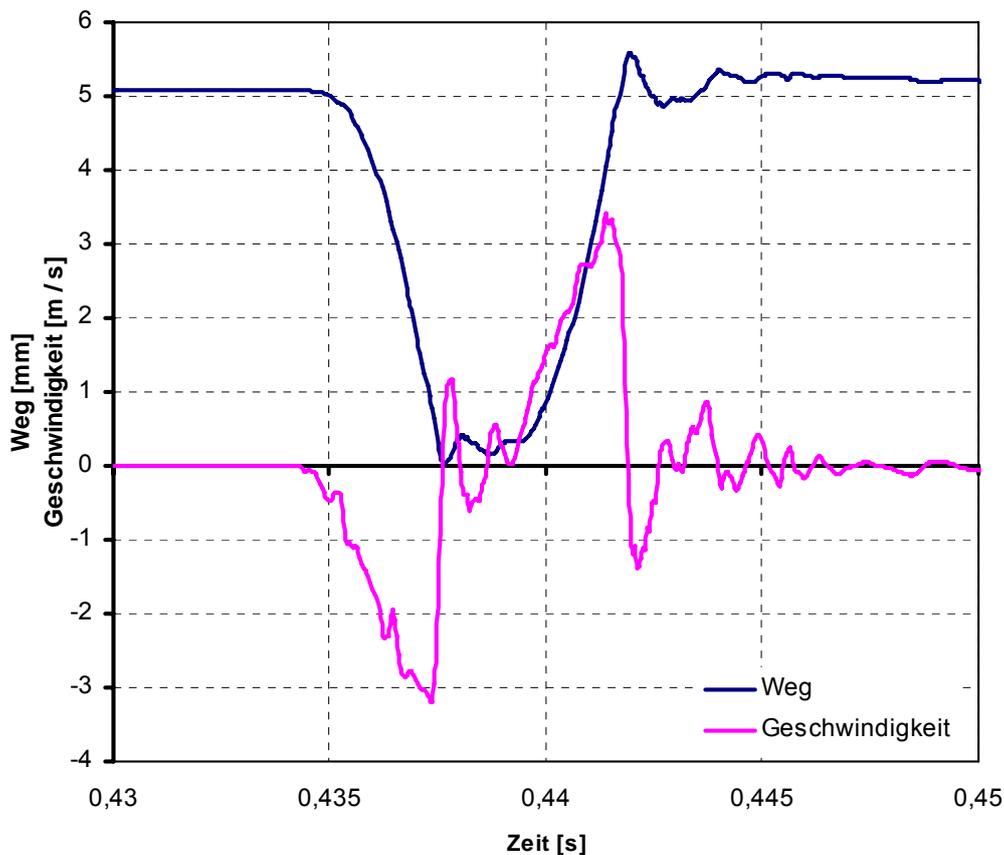


Abb. 4-53 Ergebnis der Weg-Zeit-Messung am Sprungaktor

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Demonstrator einfach aufgebaut ist und Erweiterungsmöglichkeiten bietet. Denkbar sind ein manueller Antrieb, wenn Einzelstiche ausgeführt werden sollen, eine manuelle Aufzugfeder für eine Stechsequenz mit mittlerer Frequenz bei geringer Anzahl an Stechbewegungen oder ein elektromotorischer Antrieb für eine hohe Stechfrequenz oder Anzahl an Stechvorgängen. Es wird, je nach Federsteifigkeit, eine sehr hohe und von der Stechfrequenz weitestgehend unabhängige Stechgeschwindigkeit erzielt. Lediglich ab einer konstruktiv bestimmten Drehzahl wird der Rückholvorgang ausgelöst, bevor der maximale Nadelherausstand erreicht wurde.

Übertragungsverhalten eines Abtasters mit nicht verschwindendem Abtastradius

Wie gezeigt wurde, spielt die Kurvensteuerung bei den Federaktoren, insbesondere bei den elektromotorisch angetriebenen, eine wichtige Rolle für das Spannen der Feder, also das Aufladen des Federspeichers, und das zeitlich gezielte Freisetzen der gespeicherten Energie.

Eine Steuerkurve wird nur dann verzerrungsfrei an den Ausgang des Systems übertragen, wenn der Abtaster einen verschwindenden Radius aufweist und dadurch der Berührungspunkt, bzw. die Berührlinie am Abtaster ihre Lage nicht verändert. In der Praxis wird eine Steuerkurve jedoch durch ein zumindest im Bereich der Berührfläche gerundetes Bauteil abgetastet.

Die gerundete Form des Abtasters vergrößert die Berührfläche und vermeidet spanend wirkende Bauteilkanten. Zusätzlich lässt sich bei zunehmendem Radius die Zufuhr eines Schmierstoffs zur Berührfläche verbessern, der Reibkoeffizient und damit die Reibkraft sowie die Empfindlichkeit des Abtastsystems für Unebenheiten in der Oberfläche verringern, und schließlich wird durch eine Radiuserhöhung beim Abtaster verhindert, dass sich abtriebsseitige Stöße als Rattermarken auf der Nockenoberfläche abbilden, die zu einem sich selbstständigenden Verschleißprozess durch eine Art Aufschaukeleffekt führen. Diese Effekte lassen sich mit einem größeren Radius der Abtastrolle oder des Abtaststifts verbessern. Andererseits ist man durch die Kurvenform, insbesondere durch den minimalen Schmiegekreis- oder Krümmungsradius ρ (Rho) imponierter Kurvenbereiche begrenzt. Der Radius des Abtastelements muss kleiner als ρ_{\min} sein, um - in einer ebenen Projektion betrachtet - für jeden Zeitpunkt nur einen Berührungspunkt zwischen Nockenoberfläche und Abtastelement garantieren zu können, siehe Abbildung 4-54.

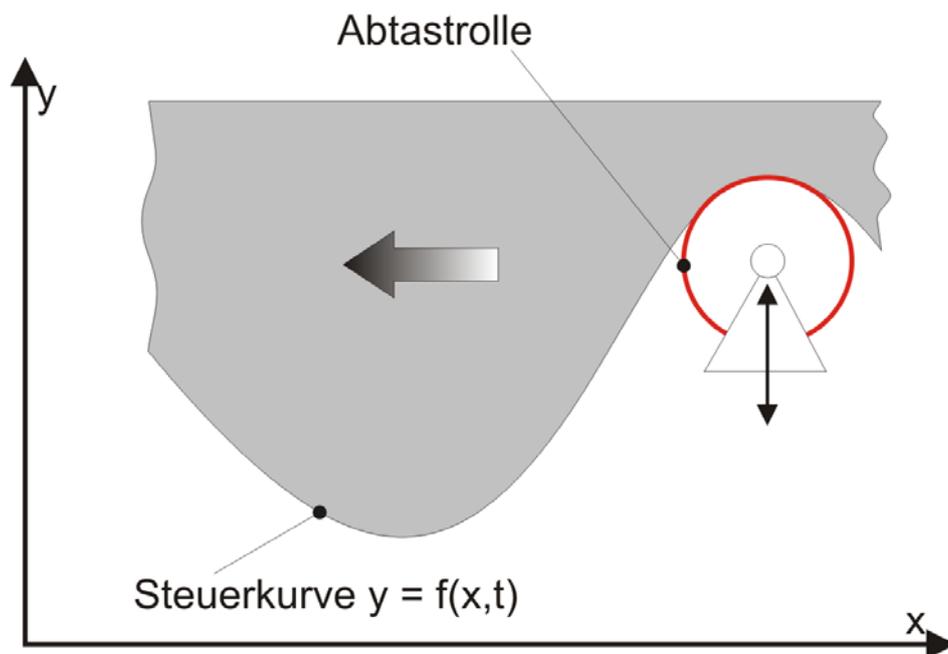


Abb. 4-54 Der maximale Radius des Abtastelements ergibt sich aus dem kleinsten Kurvenkrümmungsradius der imponierten Bereiche

Je nachdem, in welcher Darstellungsform die zu betrachtende Funktion vorliegt, lässt sich der Krümmungsradius ρ als Kehrwert der Kurvenkrümmung κ (Kappa) berechnen. Liegt die Steuerkurve in parametrischer Form $(x(t); y(t))$ vor, kann ρ gemäß (4-45) ermittelt werden. Wenn mit $y = f(x)$ die Funktion als Graph vorliegt, so kann (4-45) verwendet werden. Für eine Darstellung der Funktion in Polarkoordinaten $r = f(\varphi)$ gilt (4-46), für eine Darstellung der Funktion in ihrer allgemeinsten Form als Vektor im dreidimensionalen Raum $\underline{r}(t) = (rx(t), ry(t), rz(t))$ gilt (4-47). Dabei ist der Betrag von ρ für die Betrachtung interessant, das Vorzeichen gibt den Drehsinn der Krümmung κ und damit die Lage des Schmiegekreismittelpunkts relativ zum Funktionswert an [WiKK12], [WiKr12].

$$\rho(t) = \frac{1}{\kappa(t)} = \frac{\sqrt{(\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2)^3}}{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)} \quad (4-44)$$

$$\rho(x) = \frac{1}{\kappa(x)} = \frac{\sqrt{(1 + f'(x)^2)^3}}{f''(x)} \quad (4-45)$$

$$\rho(\varphi) = \frac{1}{\kappa(\varphi)} = \frac{\sqrt{(f(\varphi)^2 + f'(\varphi)^2)^3}}{f(\varphi)^2 + 2 \cdot f'(\varphi)^2 - f(\varphi) \cdot f''(\varphi)} \quad (4-46)$$

$$\rho(t) = \frac{1}{\kappa(t)} = \frac{\|\vec{r}'(t) \times \vec{r}''(t)\|}{\|\vec{r}'(t)\|^3} \quad (4-47)$$

Bezüglich der Berechnung von ρ ist bei der Synthese der Steuerkurve die Verwendung trigonometrischer Funktionen, wie Sinus oder Kosinus, empfehlenswert, da deren Ableitungen besonders einfach gebildet werden sowie die Lage der Extrema bekannt ist.

Beim Abtasten einer Steuerkurve, insbesondere mit einer Abtastrolle oder Ähnlichem, ist zu beachten, dass die Form der Steuerkurve ausgangsseitig nur verzerrt ausgegeben wird, was anhand der Abbildung 4-55 veranschaulicht wird: Dargestellt ist eine ausschließlich in vertikaler Richtung verschiebbliche Abtastrolle, die durch eine nicht dargestellte Federkraft zu jeder Zeit auf einer horizontal durchlaufenden Steuerkurve abrollt. Für verschiedene (zukünftige) Zeitpunkte t ist der senkrecht auf der Kurventangenten stehende Kontaktpunktradius dargestellt. Verbindet man deren freie Enden, erhält man die an den Ausgang übertragene und deutlich verzerrte Ausgangskurve (= Äquidistanz- oder Offsetkurve). Insbesondere bei imponierten Kurvenbereichen und einem Rollenradius, der nur wenig kleiner als der minimale Krümmungsradius ρ_{\min} ist, wirken sich diese Verzerrungen besonders stark aus und verursachen auch bei lastfreiem Abtrieb eine unerwartete, stoßartige Belastung. Die Verzerrung ist an der Verkleinerung, bzw. Vergrößerung der seitlichen Abstände zwischen den freien Enden der benachbarten Radien erkennbar.

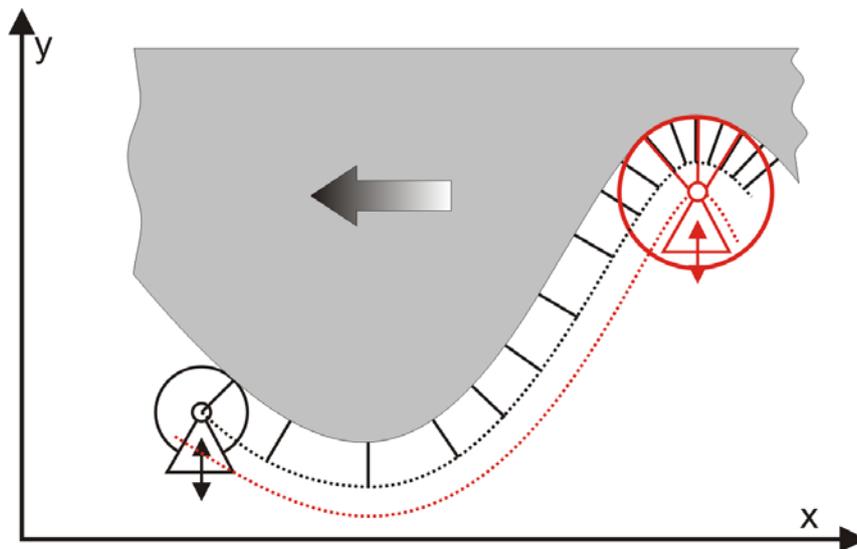


Abb. 4-55 Verzerrung der Steuerkurve beim Abtasten mit zwei Rollen verschiedenen Durchmessers

Diese Verzerrung lässt sich kompensieren, indem man zur gewünschten Ausgabe-/ Ausgangskurve eine in Richtung des Krümmungsradius um den Radius der Rolle versetzte Kurve konstruiert. Je nachdem, zu welcher Seite der Kurve die Offset-Kurve erstellt wird, kann zusätzlich die Auswirkung der möglicherweise gewünschten Verzerrung auf das Bewegungszeit-Profil untersucht werden. Beides ist besonders bei moderner CAD-Software (Solid-Works® o.ä.) einfach, da diese üblicherweise über eine Offset-Funktionalität und die Möglichkeit verfügen, Kurven als analytische Funktionen in expliziter oder parametrischer Form oder als Wertetabelle vorzugeben.

Eine Offsetkurve kann beispielsweise numerisch ermittelt werden, indem man zu jedem Funktionswert der vorgegebenen Steuerkurve $f(x)$ einen korrespondierenden Punkt der Offsetkurve erstellt. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden, um eine Offsetkurve in Parameterdarstellung zu erhalten: Man betrachte die Abbildung 4-56, auf die Darstellung der beschriebenen Zusammenhänge in Gleichungen wurde verzichtet: Die Ableitung von $f(x)$ nach x ergibt den Anstieg m der Tangente an die Funktionskurve im Punkt $(x; f(x))$. Der Anstieg ist bekanntermaßen gleich dem Tangens des Anstiegswinkels α , der sich als Neigungswinkel des Abtastrollen-Berührungspunkt-Radius r zur Senkrechten wiederfindet. Ermittelt man $\alpha = \arctan(f'(x))$, lässt sich mit dem bekannten Rollenradius r über einfache trigonometrische Beziehungen der zum Punkt auf der Steuerkurve $(x; y)$ korrespondierende Punkt $(x + \Delta x; y + \Delta y)$ auf der Offsetkurve errechnen.

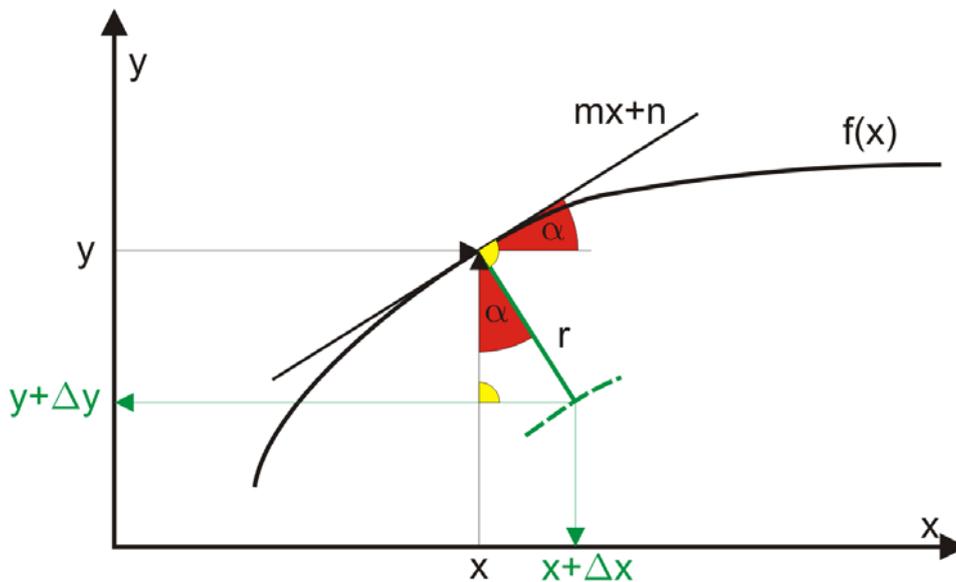


Abb. 4-56 Ermittlung einer Offsetkurve

Man erhält eine Offsetfunktion in Parameterdarstellung mit $(X(x), Y(x))$. Um die Offsetfunktion als Funktionsgraphen $Y(X)$ darzustellen, müsste man die Funktion $X(x)$ invertieren, wodurch man eine Abbildung von X nach x erhält, anschließend die Inverse $X^{-1}(x) = x(X)$ in $Y(x)$ einsetzen. Die Funktion $x(X)$ kann jedoch nur selten gebildet werden.

Eine numerische Ermittlung der Offsetfunktion kann beispielsweise mittels der Software MATLAB® in einem kleinen Programm realisiert werden. Mit MATLAB® kann die Berechnung von Gleichungen mit vektoriiellen Eingangsvariablen in nur einem Programmschritt erfolgen, allerdings geht dabei die Anschaulichkeit der einzelnen Schritte verloren. Ein Vorteil der numerischen Ermittlung ist die Anpassung der Schrittweite, eine so genannte Schrittweitenregulierung, bei der man beispielsweise die x -Schrittweite iterativ anpasst, bis ein vorgegebener Abstand jeweils benachbarter Offsetkurvenpunkte nicht überschritten wird. Eine numerisch ermittelte Offsetkurve kann unter Beachtung der Drehfrequenz bei sehr klein gewählter x -Schrittweite in guter Näherung diskret differenziert werden, wodurch sich im Verlauf der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung beispielsweise Stoß-verursachende Singularitäten identifizieren lassen. Zusätzlich gibt der zeitliche Verlauf des Winkels α Aufschluss über Drehbeschleunigungen und Verzögerungen, die am Rollenlager auftreten und eine zusätzliche Lagerbelastung darstellen.

Polynockenscheibe als Steuerkurve für Federaktoren und triviale Stechgeräte

Im einleitenden Teil zu diesem Kapitel wurde die Möglichkeit vorgestellt, den Federaktor als geladenen Antrieb auszulegen, also mehrere kleine Hubbewegungen in einem Federspeicher zwischenzuspeichern, bevor ein Auslöser nach einer festen Zahl von Ladevorgängen die gespeicherte Energie plötzlich freigibt.

Bei einem Kurbeltrieb mit großer Exzentrizität treten durch die Quer- und Längsbewegung des Pleuels nur bedingt kompensierbare Vibrationen auf. Stattdessen kann, insbesondere bei bidirektional wirkenden Federaktoren, auf eine kleine Exzentrizität und eine mehrfach gela-

dene Zwischenspeichermechanik zurückgegriffen werden. Dadurch werden die Vibrationen verringert.

Nutzt man statt eines exzentrisch auf der Motorwelle angebrachten Zylinders eine Nockenscheibe mit n Nocken, ein hier als Polynockenscheibe bezeichnetes Bauteil, werden je Umdrehung n Hubbewegungen erzeugt. Damit lassen sich zwei unterschiedliche Ziele verfolgen. Erstens kann die Hubfrequenz bezüglich der Motordrehzahl mit dem Faktor n vervielfacht werden, beispielsweise, um kleine Hubbewegungen in einem Federspeicher zu akkumulieren. Zweitens kann eine Motordrehzahl n -ten Teils verwendet werden, um die gleiche Abtriebsfrequenz zu erhalten. Damit lassen sich möglicherweise preiswertere Motoren oder Motor-Getriebe-Kombinationen mit bisher zu geringer Ausgangsdrehzahl einsetzen. Denkbar ist die Verwendung eines Federwerks, auch als Federaufzugmotor bezeichnet, für ein rein mechanisches Stechgerät. Das Prinzip der Polynockenscheibe lässt sich auch auf Stechgeräte ohne Federspeicher anwenden, da durch den Abtastvorgang eine Linearbewegung eines Kolbens erhalten wird, die sich direkt auf den Stößel eines Nadelmoduls übertragen lässt.

Die Steuerkurve einer Polynockenscheibe wird beispielsweise als Randkontur in Polarkoordinaten auf einer drehbar gelagerten Antriebsscheibe abgebildet, vgl. Abbildung 4-57. Zur Vereinfachung beziehen sich die Angaben auf die dargestellten Ausgangssteuerkurven, nicht auf die für eine verzerrungsfreie Ausgabe erforderlichen Offsetkurven der Polynockenscheiben.

Dabei muss die Anzahl der je Motordrehung vorgesehenen Ladevorgänge der Periodenanzahl der Funktion $r = f(\varphi)$ entsprechen. Die Drehachse liegt für die symbolisch als Polynockenscheibenkontur zu verstehenden Kurven im Koordinatenursprung.

Man erkennt für eine zunehmende Nockenanzahl, dass bei gleichem Hub und mittlerem Radius für die Abtastrolle der Anstieg der Steuerkurve zunimmt. Dies bewirkt, dass in Richtung der Abtastbewegungsachse bei gleich bleibendem Antriebsdrehmoment immer weniger Maximalkraft zur Verfügung steht.

Wählt man für n als Periodenanzahl je Umdrehung eine ungerade Zahl und für $f(\varphi)$ eine entsprechend angepasste Sinus- oder Kosinusfunktion, so ist der diametrale Abstand konstant, vgl. Abbildung 4-58. Ein fester Abstand von diametral gegenüberliegenden Kurvenpunkten ermöglicht eine beidseitige Abtastung der Steuerkurve und damit eine in axialer Richtung zwangsgeführte Bewegung des Kolbens für die Stech- und die Rückholbewegung, sodass auf eine rückstellende oder Andruckfeder für den Abtaster verzichtet werden kann.

Für eine praktische Umsetzung erscheinen Werte bis $n = 3$ sinnvoll, sofern ein Hub in üblicher Größenordnung gefordert wird. Für ein Stechgerät mit hoher Stechfrequenz und geringem Hub (Vibrationsvermeidung) sind dagegen Werte von $n \geq 9$ denkbar.

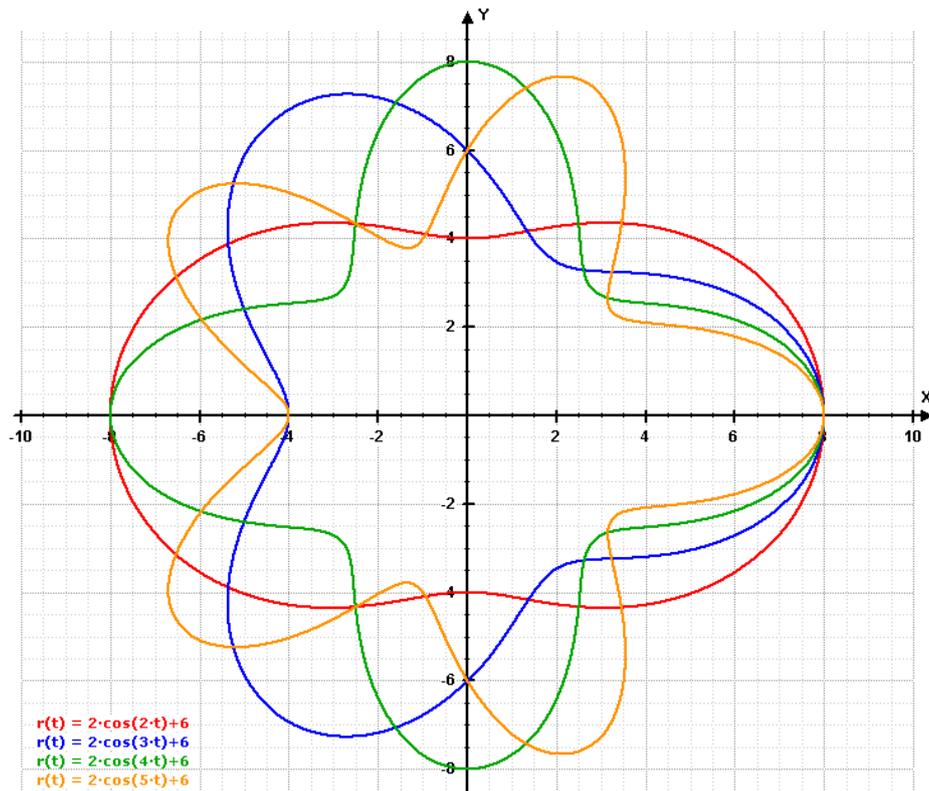


Abb. 4-57 Beispiele für Nockenscheiben mit $n = 2$ bis 5 , 4 mm Hub und 6 mm mittlerem Radius, erstellt mit [Zorn12]

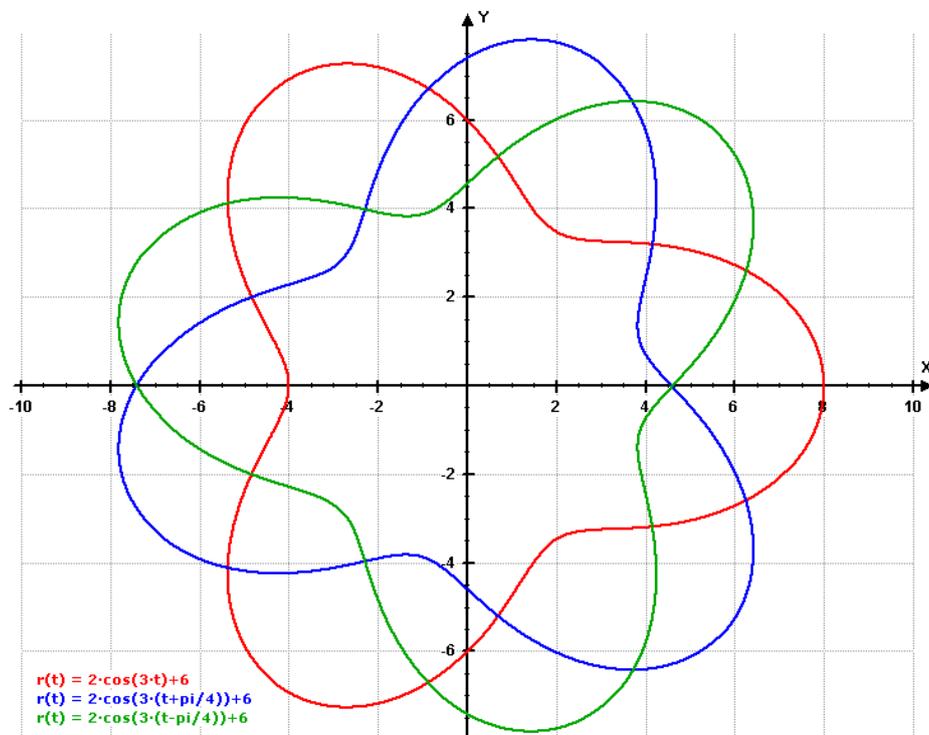


Abb. 4-58 Beispiel einer 3-Nocken-Scheibe, Drehung um 0° und $\pm 45^\circ$, erstellt mit [Zorn12]

Feder-Schnappaktor-Konzept

Die beschriebenen Druck- und/ oder Zugfederaktoren verwenden einen Auslöser, beispielsweise eine Steuerkurve oder eine andere Form der Verriegelung, um die zuvor gespeicherte potentielle Energie plötzlich freizusetzen.

Daneben gibt es bei Federaktoren die Möglichkeit, auf den Auslöser zu verzichten und das System so aufzubauen, dass es für ein elastisches Bauteil einen ersten stabilen und einen zweiten metastabilen oder stabilen Zustand aufweist. Wird das Bauteil aus dem ersten Zustand von einem treibenden Aktor in Richtung des zweiten Zustands unter weiterer Energieakkumulation in der veränderten Form des elastischen Bauteils verschoben, erfolgt ab einem Instabilitätspunkt ein selbstständiges und plötzliches Freisetzen der gespeicherten Energie als schnappartige Bewegung in den zweiten Zustand, aufgrund der Masseträgheit teils darüber hinaus. Wenn der treibende Einfluss des Antriebs entfällt und der zweite Zustand metastabil ist, kehrt das System selbständig in den stabilen Erstzustand zurück. Dieses Verhalten ist allgemein von Kinderspielzeug bekannt, beispielsweise von so genannten Knackfröschen („Klacker“) oder Fangbechern, siehe Abbildung 4-59.



Abb. 4-59 Kinderspielzeug als Beispiele für Federaktoren: links Knackfrosch und rechts Fangbecher [WiKF12], [Frank12]

Wie hoch die Geschwindigkeit, bzw. die Beschleunigung sein kann, zeigt eindrucksvoll der Fangbecher, bei dem der Ball meterhoch geschossen wird.

Für die Verwendung solcher Feder-Schnappaktorik in einem Stechgerät kann das elastische Element auch zwei stabile Zustände aufweisen, wobei der Stößel vom Aktor in beide Richtungen zwangsgeführt sein muss, beispielsweise ein Kurbeltrieb oder ein Antrieb mit der oben beschriebenen diametralen Doppelabtastung einer (Poly-) Nockenscheibe.

Neben Schnappaktoren mit kragbalkenförmigem elastischem Element sind Aktoren nach dem Kippschalter-Prinzip denkbar. Hierbei wirkt auf einen in Richtung einer Stechachse verschieblichen Kolben eine schräg angreifende Federkraft, die den Kolben in eine obere Endlage zwingt. Wird der Kolben aus dieser Lage in Stechachsenrichtung verschoben, so wird die Feder weiter komprimiert, wobei sich der Federkraft-Angriffswinkel zunehmend vergrößert. Ab einem Winkel von 90° wird das System instabil, da die Federkraft nun in Bewegungsrichtung wirkt. Die zusätzlich zur Vorspannkraft gespeicherte Energie wird plötzlich frei, der Kolben wird stark beschleunigt und wird in der zweiten stabilen Endlage von einem Anpralldämpfer aufgefangen. Dieser Vorgang lässt sich in beide Richtungen ausführen. Das Bewegungsverhalten kann durch die Hebelverhältnisse, die Federsteifigkeit und -vorspannung oder das vorgesehene Spiel zwischen Antrieb und Federhebel beeinflusst werden.

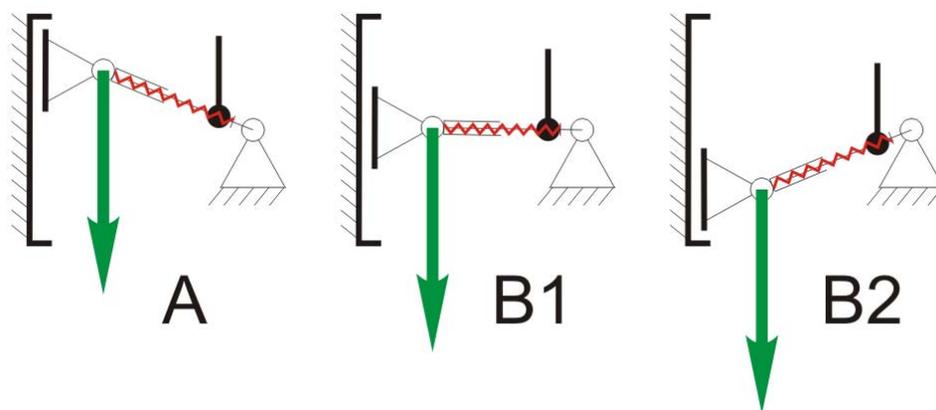


Abb. 4-60 Verhalten eines Feder-Schnappaktors (eine Periode) nach dem Kippschalter-Prinzip

Bei Schnappaktoren mit kragbalkenartigem elastischem Element kann insbesondere für flache, blechartige Federelemente eine seitliche Drehung um die beiden Einspannpunkte statt der Bewegung des Federelements in einer Ebene ausgeschlossen werden. Bei der Verwendung von Rundmaterial, beispielsweise von hoch elastischem Nitinol-Runddraht, muss das seitliche Ausweichen des Systems verhindert und eine Zwangsführung für die Bewegung in einer Ebene vorgesehen werden.

Die Abbildung 4-61 zeigt schematisch das Verhalten eines ähnlich dem oben gezeigten Fangbecher aufgebauten, beidseits mit je einem Freiheitsgrad gelagerten Kragbalkens mit einem bezüglich der Kragbalkenlänge verkürzten Lagerabstand, bei dem nahe einer oder beider Lager eine eingangsseitige Verschiebung und / oder eine Winkeländerung erfolgt (schwarzer Stößel). Der Abgriff erfolgt dabei seitlich oder mittig am Kragbalken (grüner Stößel).

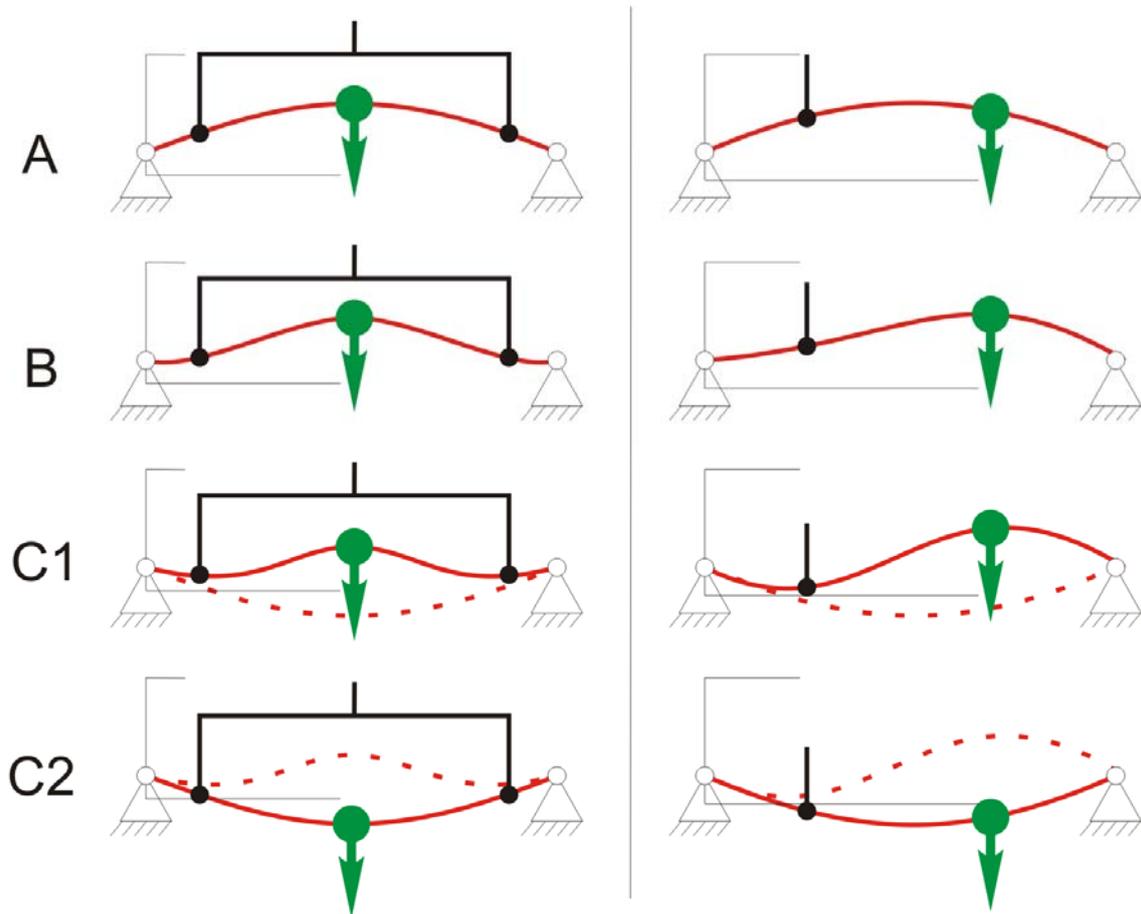


Abb. 4-61 Verhalten eines Feder-Schnappaktors (eine Periode) bei ein- oder beidseitiger Verschiebung nahe der drehbaren Einspannung mit festem Lagerabstand

Für Versuche wurde ein Funktionsmodell aufgebaut, anhand dessen die Form der Ein- und Ausgabe untersucht wurde. Beispielsweise kann eine Winkeländerung oder eine Verschiebung am Eingang und / oder am Ausgang vorgesehen sein.

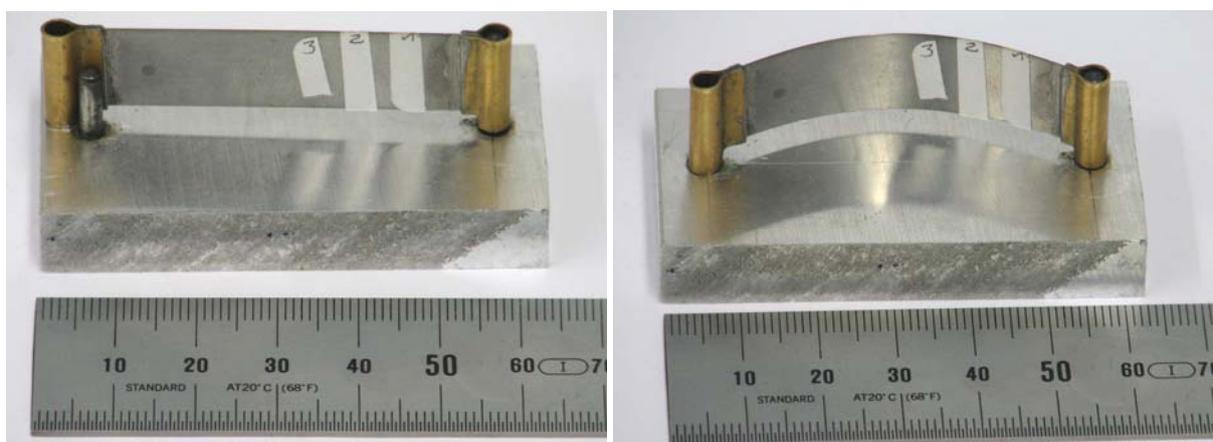


Abb. 4-62 Testmodell eines Feder-Schnappaktors, links mit entspannter Feder, rechts in einer stabilen Ausgangslage, Markierungen für die Positions-Zeit-Messung

Am in der Abbildung 4-62 gezeigten Modell wurden zeitlich hoch aufgelöste Positionsmessungen mittels eines Laser-Triangulationssensors durchgeführt. Nahe der links gezeigten Einspannung wurde einseitig durch manuelle Manipulation eine Verschiebung des Federblechstreifens bewirkt und dabei die Position desselben an den drei durch Klebestreifen gekennzeichneten Stellen gemessen. Den Verlauf der aus den Messwerten abgeleiteten Geschwindigkeits-Weg-Funktion zeigt die Abbildung 4-63.

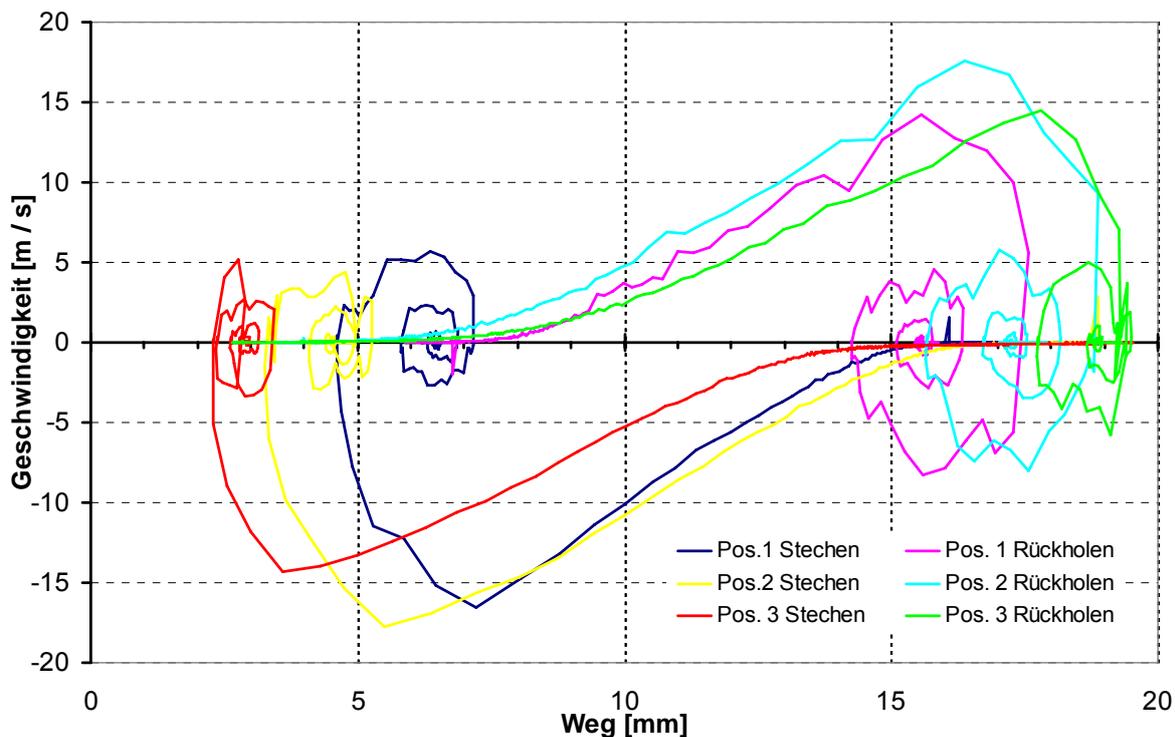


Abb. 4-63 Geschwindigkeits-Weg-Funktion für das Feder-Schnappaktor-Modell

Die maximale Geschwindigkeit beträgt etwa 17,5 m/ s und wurde für die Position 2 erhalten. Ohne Berücksichtigung des Überschwingens beträgt der Hub dabei etwa 15 mm. Die Messwerte lassen sich wegen der frei gewählten Federsteifigkeit und -vorspannung nur bedingt auf ein Stechgerät übertragen, zeigen jedoch die gute Wirksamkeit des Konzepts.

Fazit

Mittels Federaktoren kann eine hohe Nadel- oder Stechgeschwindigkeit erreicht werden, der Aufbau ist einfach und kostengünstig möglich. Nachteilig sind ein deutlich wahrnehmbares Betriebsgeräusch und, wegen der großen Stoßbelastungen, ein vor- oder sogar frühzeitiger Verschleiß. Die verschleißenden Teile können möglicherweise konstruktiv in das Verbrauchsmaterial ausgelagert werden, wobei neue Anforderungen an das Material zu stellen sind.

Nicht untersucht wurden Effekte, bei denen das Stechwerkzeug als Masse-Feder-Dämpfer-System mit Fußpunktanregung an das Stechgerät angekoppelt und beispielsweise nahe der Resonanz betrieben wird. Ein Vorteil dabei ist die Wegentkopplung zur Zwangsbewegung des anregenden Antriebs (z.B. Kurbeltrieb), sodass sich die Eindringtiefe der Hautbeschaffenheit

und dem Hautuntergrund anpassen kann, wie es typisch bei Spulenmaschinen ist. Ein weiterer Vorteil ist die Amplitudenvergrößerung beim eigenfrequenznahen Betrieb.

4.2 Ansatz: Hautelastizität

Eine wesentliche Eigenschaft der Haut bezüglich des Ausweichens beim Versuch einer Penetration ist ihre Elastizität. Daher liegt es nahe, die Elastizität der Haut während des Penetrationsvorgangs, bzw. unmittelbar davor zu ändern. Durch diese Änderung weicht die Haut weit weniger der eindringenden Nadel aus, sodass die gewünschte Stech- oder Applikationstiefe deutlich enger toleriert erreicht wird.

Bereits durch das Drücken neben der Einstechstelle wird ein Versteifungseffekt erzielt, den man leicht nachprüfen kann: wird mit Daumen und Mittelfinger bei z.B. zweifach zeigefingerbreitem Abstand zwischen beiden alternierend ein Druck auf Haut ausgeübt, kann mit dem zwischen beiden die Haut tastenden Zeigefinger die gleichzeitige Zunahme des Widerstands in senkrechter Richtung gefühlt werden.

Die Vorspannung der Haut wird üblicherweise manuell vorgenommen. Dabei wird die Haut in ihrer tangentialen Ebene durch eine spreizende Fingerbewegung oder durch das Umgreifen des Arms von der Gegenseite gespannt. Der dabei notwendige Druck der Finger zur Vermittlung einer Reibkraft bewirkt zusätzlich eine Versteifung in vertikaler Richtung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere Ansätze hierzu entwickelt: Das Vorspannen der Haut kann automatisch oder selbsttätig während des Stechvorgangs erfolgen, beispielsweise aktiv durch zusätzlich eingetragene Energie. Ein neu entwickeltes Stechverfahren und ein weiterer konstruktiver Vorschlag nutzen die begrenzte Dehnbarkeit der Haut, um das Hautausweichen zu minimieren. Des Weiteren wurde mit dem gleichen Ziel eine Versteifung der Haut durch eine zusätzlich angebrachte Schicht bewirkt und untersucht.

4.2.1 Hautvorspannung durch aktiven Energieeintrag

Ein zusätzlicher Energieeintrag ist nur bedingt praktikabel. Viele marktübliche Stechgeräte werden bereits mit begrenzter Leistungsreserve betrieben, sodass ein zusätzliches Abzweigen von Energie zum Bewegen von Haut spannenden Bauteilen oder das Erzeugen von Druckluft oder Vakuum bisher wenig einsetzbar ist. Denkbar ist hier die Verwendung von Antrieben mit einer größeren Leistungsreserve, einer anderen Eingangsenergieform oder einer Aktormechnik, die eine Energiezwischen-speicherung vornimmt, sodass beispielsweise ein Antriebszyklus in einem Federspeicher zwischengespeichert und im Gegensatz zum vorigen Kapitel während eines weiteren Antriebszyklus dafür genutzt wird, um zusätzlich vorhandene Bauteile zu bewegen.

Ein weiteres Problem beim tangentialen Spannen von Haut ist, dass letztere insbesondere während einer Stechbehandlung mit hoher Stechfrequenz zunehmend lokal perforiert wird, was die Gefahr des Hautreißen an dieser Stelle bei entsprechender tangentialer Vorspannung stark erhöht. Besonders bei der Verwendung von Nadeln mit schneidenden Geometrien, wie

Kanülen, wird eine mehrfach erhöhte Gefahr gesehen, was im Kapitel 4.2.4 näher beleuchtet wird.

Trotz der momentan schlechten Prognose werden die entwickelten Ansätze vorgestellt, da zu einem späteren Zeitpunkt und unter neuem Aspekt eines der Verfahren möglicherweise praktikabel wird.

Die Reihenfolge der in diesem Kapitel vorgestellten Ansätze steht in keinem Zusammenhang mit einer Bewertung oder Rangfolge hinsichtlich ihrer Praktikabilität oder Eignung zur Verminderung des Hautausweichens.

4.2.1.1 Hautauflage mit ringwirbelartig rotierender Feder

Dieser Ansatz verfolgt die Idee, die Haut in tangentialer Richtung und möglichst in alle Richtung weg von einer zentral liegenden Stechstelle durch miteinander gekoppelte rotierende Walzen zu spannen.



Abb. 4-64 Fotos des experimentellen Ringfuß-Aktivspanners, oben eine Gesamt-, unten Detailansichten bei entfernter Federwelle

Für ein Labormuster wurde eine eng gewickelte Zugfeder als biegsame Welle und gleichzeitig als Reibspirale verwendet, durch ein Rohr geführt und auf einen ringförmigen, stabilen Mitteldraht gefädelt, dessen Ende mit dem Führungsrohr verlötet war. Das freie Ende des Mitteldrahts wurde im Lumen (Innenraum) der Feder bis weit in den geraden Teil des Führungs-

rohrs geführt und folgte dabei dessen Mittellinie. Um die Steifigkeit der Feder zu erhöhen und um zu verhindern, dass sie sich weiter zusammenwickelt, wurde von der Gegen-/ Antriebsseite her ein gerader Draht eingeführt. Den Aufbau verdeutlicht die Abbildung 4-64. Erste Versuche zeigten die gute Wirkungsweise, jedoch ergaben sich auch Schwächen dieser konstruktiven Umsetzung. So traten relativ große Reibungsverluste aufgrund der engen Radien, der gestreckten Federausgangsform und der ungünstigen Reibpaarungen auf. Dadurch gab es wenig Drehmomentreserve für ein genügendes Anpressen der ringförmigen Hautauflageschleife. Verbesserungen und konstruktive Umgestaltungen sind nötig, sofern das Konzept weiter verfolgt würde.

Ein weiterer Nachteil wird in einem in dieser Ausgestaltung notwendigen zusätzlichen Antrieb gesehen, der die Praktikabilität dieses Konzepts in Frage stellt. Auch ist für die Anwendung auf behaarter Haut eine Ummantelung der Feder mit einem Reibmaterial notwendig, um versehentliches Epilieren zu verhindern.

Als Konstruktionsvariante ist eine Hautauflage denkbar, in der sich mehrere, über gelenkige Verbindungen miteinander verbundene Reibrollen befinden. Dies könnte ein zusätzliches Gerät mit eigenem Antrieb darstellen.

4.2.1.2 Spreiz- oder Greif-Modulspitze

Dieses Konzept sieht vor, einen Teil des vom Stechaktor abgegebenen Nadelhubs für einen aktiven Hautspannmechanismus zu verwenden, z. B. für einen in seitlicher Richtung spreizend oder greifend wirkenden Stempel mit zangenartigen Werkzeugenden. Erste Vorversuche mit manuell geführten Stempeln zeigten eine geringe Effektivität und die Notwendigkeit eines großen Hubs der Werkzeuge für eine Spreizbewegung für ausreichende Vorspannung der Haut. Eine Greifbewegung wurde nicht näher untersucht. Besonders für flache, linienartige Applikationen ist dieser Ansatz besser geeignet, da die Haut beidseitig gegriffen und zu einer Falte zusammen geschoben wird, deren Wulstrücken sehr gut für eine senkrecht stechende Nadel positioniert ist. Die Applikationstiefe in der Haut wird durch den seitlichen Versatz der Nadel zur Greifzangenoberfläche eingestellt, die Eindringtiefe der Nadel bestimmt somit die Länge des Applikationskanals. Die Recherche ergab, dass dieser Ansatz bereits, zumindest in Teilen, Stand der Technik ist.

Daher wurde auf eine weiterführende Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Dies soll jedoch nicht den Schluss zulassen, dass dieses Konzept als ungeeignet angesehen wird oder keine begrenzte erfinderische Höhe vorliegt. Lediglich die Zeit und die Mittel waren begrenzt, um jeden der vorgestellten Ansätze und diesen zu verfolgen und auszukonstruieren, bzw. zu optimieren.

4.2.1.3 Luftdruck-basierte Konzepte

Der Umgebungsluftdruck dient als Bezugspotential, wenn man mittels eines Luftdruckgefälles in die eine oder andere Richtung Energie transportieren und an einem Aktor in mechanische Bewegungsenergie umwandeln möchte. Besonders vorteilhaft bei der Verwendung von Luft als Energieüberträger ist, dass die entspannte Luft sauber in die Umgebung entlassen werden kann. Bei der Verwendung eines flüssigen Arbeitsfluids müssen üblicherweise eine Rückführung des Fluids zur Antriebspumpe und eine aufwendige Abdichtung vorgesehen sein.

Als druckluftbasierte mechanische Antriebe für die Erzeugung von Linear- oder Drehbewegungen kommen Kolben-Zylinder-Einheiten oder Lamellenmotoren zum Einsatz. Bisher haben sich solche pneumatischen Antriebe in Stechgeräten mit hoher Stechfrequenz, insbesondere im Tattoobereich, nicht durchgesetzt. Eine Ursache dafür ist das Gewicht der benötigten Druckluftquelle und der geringe Wirkungsgrad solcher Antriebe sowie das nur mit Aufwand zu verringernde Betriebsgeräusch. Im Bereich kosmetischer Anwendungen findet man einige Stechgeräte für Einzelstechbewegungen für Mesotherapie-Behandlungen und Faltenunterspritzungen. Hier werden wegen der verabreichten hochviskosen Fluide verlängerte Dosierintervalle gefordert, die sich besonders einfach mit einem pneumatisch angetriebenen Handgerät und entsprechender elektronischer Ansteuerung der Ventile realisieren lassen. Ein Beispiel hierfür wurde im Kapitel 2.3 vorgestellt.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein Luftdruckgefälle oder beispielsweise den beim strömenden Fluid auftretenden Venturi-Effekt für das Vorspannen der Haut zu nutzen.

Vakuummodul mit Hyperbolspitze

Dieses Konzept sieht vor, die Haut durch einen Unterdruck trommelfellartig über die Mündung des Stechgeräts zu spannen und so das Hautausweichen zu verhindern. Dabei ist es wichtig, trotzdem ein leichtes Gleiten der Düse in allen Arbeitsrichtungen zu gewährleisten. Das bedeutet, die zu konstruierende Vakuumdüse soll genügend Saugkraft haben, um die Haut gegen den Druck der einstechenden Nadel festzuhalten, andererseits soll sie die Haut nicht zu fest ansaugen, damit kein Hineinwölben in eine Ansaugöffnung das Gleiten behindert.

Für die Gewinnung des Unterdrucks bestehen mehrere Möglichkeiten. Der Unterdruck kann von einem externen Gerät erzeugt werden, beispielsweise einer Membran- oder Kolbenpumpe. Liegt Druckluft vor, kann auch eine Injektorpumpe auf der Basis des Venturi-Effekts verwendet werden. Ein solcher Injektor lässt sich auch im Einwegmodul realisieren, was sich besonders einfach bei druckluftbetriebenen Mesotherapiegeräten realisieren lässt.

Bei einem elektromotorisch betriebenen Stechgerät besteht zusätzlich die Möglichkeit, bei genügender Leistungsreserve des Antriebs mit der Hubbewegung des Nadelstößels eine miniaturisierte und in das Verbrauchsmaterial integrierte Unterdruckpumpe zu betreiben.

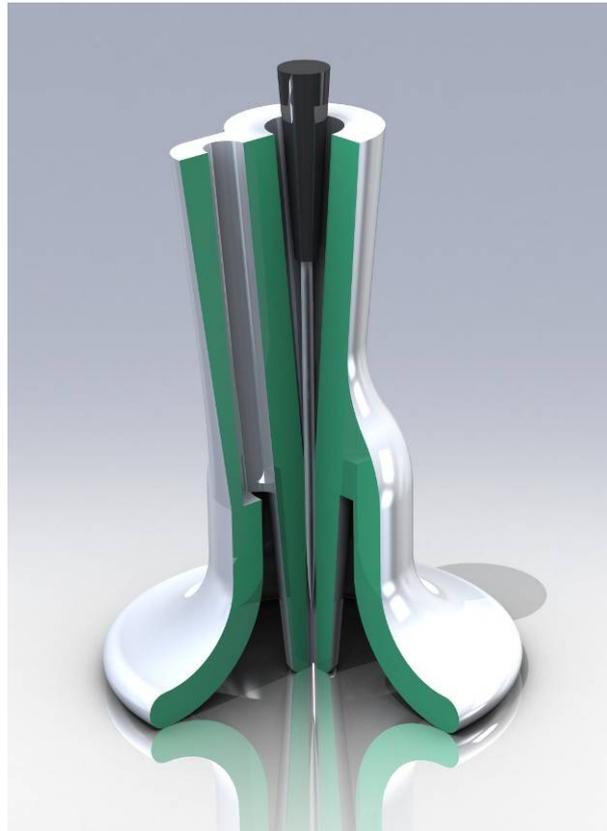


Abb. 4-65 Schnitt durch eine als Vakuumdüse ausgestaltete Stechmoduls Spitze, Designvorschlag, CAD-Bild

Herausragende Vorteile der in den Einweg-Modulkörper integrierten Vakuumpumpe (z.B. Kolben- oder Injektorpumpe) gegenüber einer entfernt liegenden Unterdruckquelle sind der wegen des stark reduzierten Totraums schnell aufgebaute Unterdruck und eine unkritische Kontamination der Einweg-Vakuumpumpe durch eventuell angesaugte Behandlungsflüssigkeit, die gegebenenfalls mit Blut und Lympheflüssigkeit versetzt ist. Bei entfernten Unterdruckquellen müssen entsprechende Separatoren für angesaugte Flüssigkeiten oder Filter zwischengeschaltet werden.

Funktionsprinzip der Hyperbolspitze

Die Luft wird aus dem Mündungsraum der Vakuumdüse über einen tiefer gelegenen, umlaufenden und schmalen Ringspalt abgezogen, der durch seine Form verhindert, dass die Haut bis dorthin eindringt und die Absaugöffnung verschließt.

Um die Forderung nach leichtem seitlichem Gleiten auf der Haut bei sicherem Halten und Spannen der Haut zu realisieren, wurde die Form der Vakuumdüse geeignet gestaltet. Die den Nadelkanal bildende Begrenzung dieses Mündungsraums ist steilwandig-keglig, die äußere Begrenzung ist trichterförmig-hyperbolisch gestaltet. Beim Aufsetzen der Düse auf die Haut wird vom inneren und äußeren Rand der Düsenmündung zunächst eine definierte Hautfläche gegen die Umgebung abgedichtet. Die spezielle Wandgestaltung bewirkt, dass sich mit Wirkung des Unterdrucks im Düsenraum (bzw. mit zunehmender Wirkung des relativen Umgebungsüberdrucks) die Haut in den Düsenraum wölbt, die rückstellende Gewebezugkraft mit der Wölbung zunimmt und gleichzeitig die druckbeaufschlagte Fläche überproportional ab-

nimmt, wie man an der in der Abbildung 4-66 vom Zustand 1 bis 4 dargestellten abnehmenden Länge der Grenzlinie zwischen Hautoberfläche und Düsenraum erkennt.

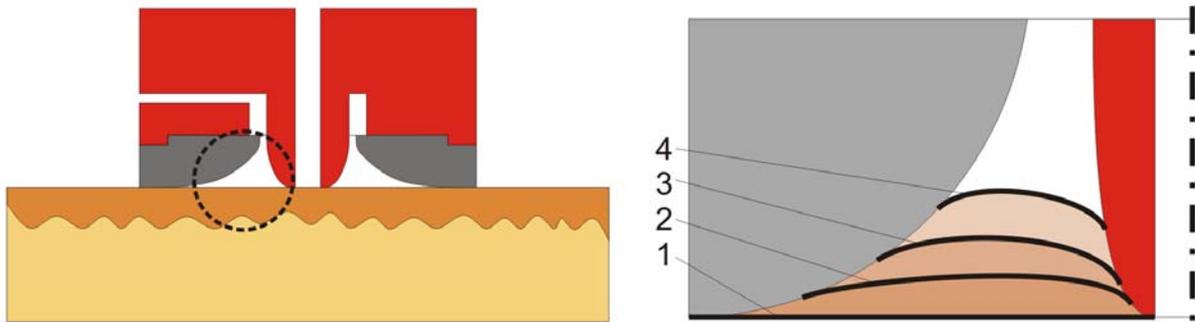


Abb. 4-66 Schematische Darstellung der Form der Vakuumdüse (links) und die Verhältnisse beim Hautwölben durch Unterdruck im Düsenraum (rechts)

Damit sinkt die durch den Unterdruck vermittelte Zugkraft auf die Haut (Druck = Kraft pro Fläche), sodass eine Art Gegenkopplung auftritt und sich ein Gleichgewicht einstellt. Je schneller die Fläche beim Hautwölben abnimmt, desto weniger wird die Haut angehoben bzw. gewölbt, was das seitliche Gleiten mit der Düse auf der Hautfläche erleichtert. Andererseits sorgt eine Wölbung der Haut für deren tangentielle Vorspannung über den inneren Rand des Düsenraums, was das Hautausweichen bei einer Stechbewegung verringern oder verhindern soll. Dies verdeutlicht die Abbildung 4-68 schematisch. Dargestellt sind links die Verhältnisse ohne und rechts mit konstantem Unterdruck im Düsenraum.



Abb. 4-67 Demonstration zur Wirksamkeit der Vakuumdüse auch beim Anheben und seitlichen Verschieben

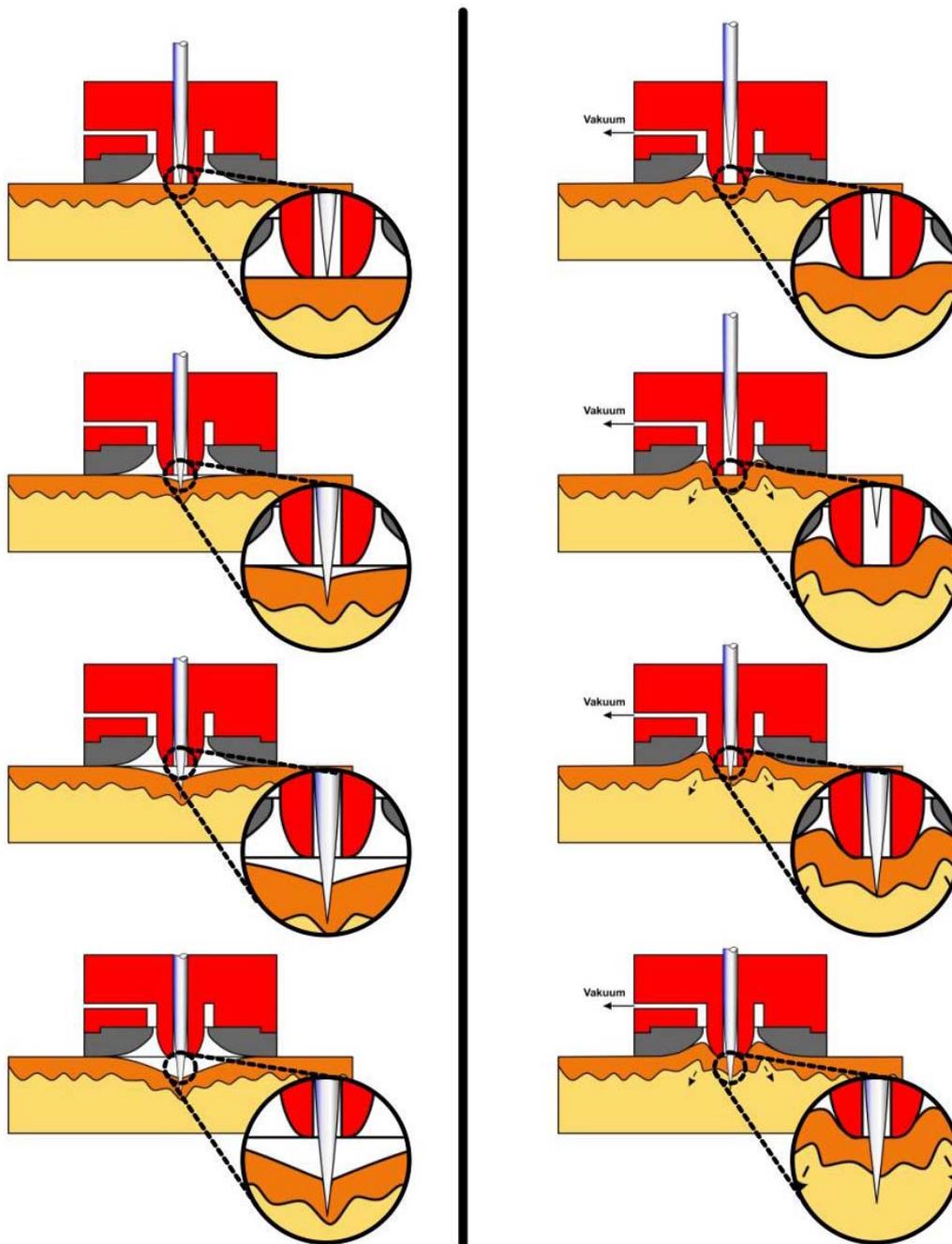


Abb. 4-68 Wirkprinzip der Vakuumdüse anhand einer schematischen Darstellung, links Stechvorgang ohne und rechts mit angelegtem Unterdruck

Erste Versuche zeigten viel versprechende Ergebnisse, siehe Abbildung 4-67. Das Konzept wurde bisher nicht weiter verfolgt. Die Modifikationen am Einweg-Stechmodul bedürfen eines zusätzlichen Konstruktionsaufwands und erhöhen den Preis des Verbrauchsmaterials sowie den Montageaufwand, was den erzielbaren Vorteil möglicherweise nicht rechtfertigt. Des Weiteren existieren eine Reihe ähnlicher Produkte, sodass für weitere Entwicklungen wenig Aussicht auf das Erreichen einer genügenden erfinderischen Höhe und eines Alleinstellungsmerkmals für das neue Produkt besteht.

Vorteilig ist, dass die Unterdruckquelle nur einen sehr geringen Volumenstrom fördern muss, da bei der vorgeschlagenen Form der Düse in den Versuchen selbst bei trockener Haut und

seitlicher Gleitbewegungen der Düsenrand sehr gut dichtete. Auf die Haut gegebene Flüssigkeit oder ein Pflegemittelfilm erleichtern zudem das Gleiten und verbessern die Dichtigkeit.

Druckluftstrahldüse

Statt eines Unterdrucks kann ein Druckluftstrahl verwendet werden, um die Haut tangential zu spannen. Die Abbildung 4-69 zeigt den Aufbau vor dem eigentlichen Versuch, der mit einer Highspeed-Kamera dokumentiert wurde. Das Experiment erfolgte mit einer Kanüle 30G, Durchmesser 0,3 mm und einer Stechfrequenz von etwa 100 Hz, wobei die Modulspitze über den mittels eines Druckluftstrahls gespannten Hautbereich geführt wurde.



Abb. 4-69 Versuchsaufbau zum Spannen von Haut mit einem Druckluftstrahl

Dabei trennte sich durch die tangential wirkende Vorspannkraft versehentlich die obere Hautschicht lokal entlang der Perforationslinie, sodass Luft in den Extrazellulärraum der Dermis bzw. in den subkutanen Raum drang und sich ein massives Hautemphysem bildete. Dieses heilte komplikationslos ab, legte jedoch das Überdenken des Konzepts nahe.

Dabei wurden neben dem beschriebenen weitere Nachteile aufgedeckt, weshalb der Ansatz vorerst verworfen wurde. Nachteilig sind die starke Verwirbelung im Behandlungsraum, die störende Geräusentwicklung, die Möglichkeit der Fernkontaminationswirkung von mitgerissener Flüssigkeit, die Abkühlung und die Austrocknung der Haut und der zusätzliche Energiebedarf für das Bereitstellen der Druckluft sowie die umständliche Handhabung des Verfahrens.

4.2.2 Vorspannung durch flaches Kamm- oder Gegenstechen

Beim Konzept des Kammstechens werden prinzipiell Stechwerkzeuge gegenläufig und unmittelbar aneinander vorbei, dabei sich überkreuzend sowie unter flachem Winkel zur Hautoberfläche vorgeschoben, wobei die dem Stechwerkzeug ausweichende Haut (vgl. mit der Abbildung 2-5) aufgrund begrenzter Dehnbarkeit des zwischen den Ansatzstellen befindlichen, minimalen Hautbereichs lokal stark vorgespannt wird, sodass die Nadeln praktisch mühelos in die Haut eindringen. Da sich der seitliche Wirkungsbereich beider Nadeln wegen des geforderten kleinen Abstands überschneidet, erleichtert eine Nadel das Eindringen der anderen und umgekehrt. Zusätzlich wird wegen des geringen seitlichen Versatzes der Werkzeuge das entstehende Moment M_{res} gering gehalten und durch die Wirkung eines weiteren benachbarten Werkzeugs aufgehoben.

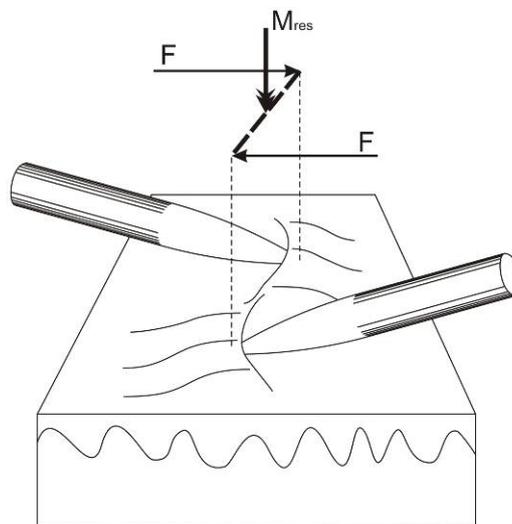


Abb. 4-70 Prinzip des Kammstechens

In der Abbildung 4-71 wird ein Labormuster gezeigt, welches auf der Basis einer Pinzette mit auswechselbaren Branchen aufgebaut wurde.



Abb. 4-71 Funktionsmuster, links in einer Gesamtansicht, rechts Detailansicht der Werkzeuge

Die ersten Versuche mit dem Funktionsmuster verliefen sehr viel versprechend. Ohne eine Stechtiefenbegrenzung oder einen expliziten Abstandshalter ließ sich die Haut bei einer Vielzahl von Stechversuchen vollständig unblutig penetrieren. Zu Demonstrationszwecken wurde eine vergleichsweise große (Zug-) Kraft in die derart gegriffene Hautstelle eingeleitet.



Abb. 4-72 Unblutige Hautreaktion nach mehr als 40 Versuchen mit je 2 x 9 Nadeln am Unterarm

Die beobachtete geringe Stechtiefe ermöglicht einen flachen Wirkstoffeintrag, was beispielsweise durch die Perforation der epidermalen Hornschicht für eine verbesserte Wirkstoffaufnahme bei der transdermalen Verabreichung von lokal oder systemisch wirkenden Stoffen günstig ist. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind Allergietests, Behandlungen zur epidermal vermittelten Hyposensibilisierung, Gabe von Impfstoffen, Analgetika, Hormonen und sonstigen Pharmazeutika, aber auch zur Applikation von kosmetischen Stoffen oder zur Anregung der Stoffwechselaktivität bestimmter Hautschichten oder der gesamten Haut in diesem Bereich.

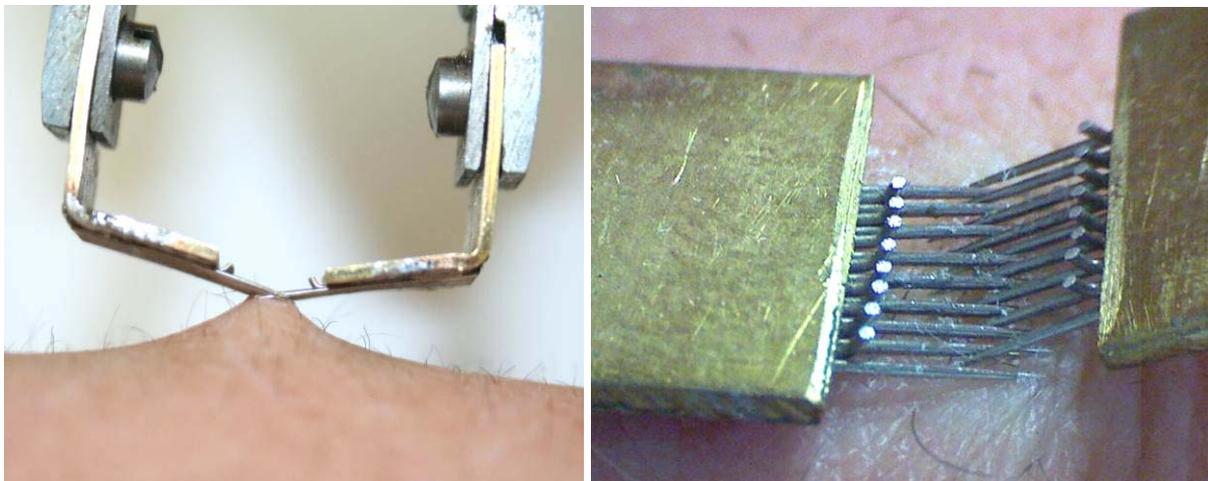


Abb. 4-73 Demonstration der guten Griffigkeit des Funktionsmusters in Haut

Die bei entsprechender Epidermisdicke schmerzfreie Anwendung aufgrund der flachen Stechtiefe wurde mit dem in der Abbildung 4-74 gezeigten Stechen in den besonders empfindlichen Tastbereich der Zeigefingerbeere demonstriert.



Abb. 4-74 Demonstration des schmerzfreien Stechens an einer Fingerbeere, Zeigefinger linke Hand

Mit dem auf die Hautoberfläche aufgesetzten Labormodell kann man nicht seitlich in Richtung der Nadeln gleiten, da die Nadeln sonst ungewollt in die Haut eindringen können. Des Weiteren kann sich bei leicht geöffneter Nadelanordnung die Haut durch den Auflagedruck in den Spalt vorwölben und anschließend versehentlich blutig durchdrungen werden. Um im ersten Fall das sichere Gleiten zu ermöglichen und den zweiten Fall auszuschließen, wird eine Führungsspitze vorgeschlagen. Diese besteht im einfachsten Fall aus einem gebogenen federnden Blechstreifen, der von der der Haut gegenüber liegenden Seite gegen die Nadelkämme drückt. Die Führungsspitze kann auch als Bauteil separierende Führungsrillen für jede Nadel aufweisen. Zusätzlich können eine oder mehrere Öffnungen vorgesehen sein, durch welche die massiven Nadeln oder die Hautoberfläche mit einer Flüssigkeit benetzt wird, die in die Haut eingetragen werden soll, z.B. Tätowierfarbe, Arznei-, Wirk- oder Impfstofflösungen und dergleichen. Einen Designentwurf einer solchen Führungsspitze zeigt die Abbildung 4-75.

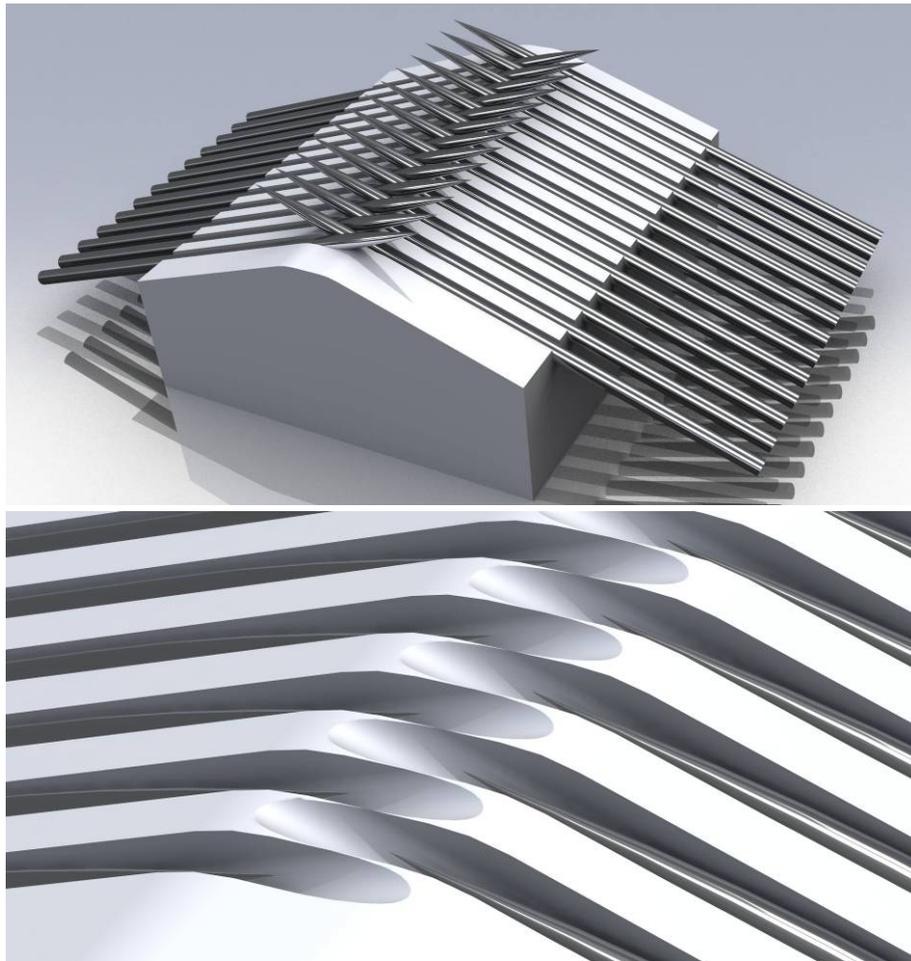


Abb. 4-75 CAD-Modell einer Führungsspitze, oben in der Übersicht mit geschlossenen Nadelkämmen, unten in einer Detailansicht, Nadelkämmen geöffnet

Das Konzept des Kammstechens ist vielseitig anwendbar, z.B. zum Stechen oder Schneiden, Greifen oder Halten von Haut oder Gewebe im weiteren Sinne, aber auch zum Halten oder Befestigen von Gegenständen am Gewebe oder zum Vermitteln einer Kraft auf das Gewebe.

Vorteilhaft ist, dass beim Kammstechen keine weiteren Maßnahmen notwendig sind, um die Haut vorzuspannen. Zudem kann aktorseitig auf eine hohe Stechgeschwindigkeit verzichtet werden, vor allem, wenn das Erreichen einer flachen Stechtiefe in vertikaler Richtung angestrebt wird. Dies prädestiniert das Verfahren für manuelle Behandlungsgeräte.

Aktuell werden verschiedene Ausgestaltungsvarianten für modifizierte Module entworfen und aufgebaut, um die Anwendbarkeit in einem praxisnahen Test zu untersuchen, Beispiele zeigt die Abbildung 4-76.

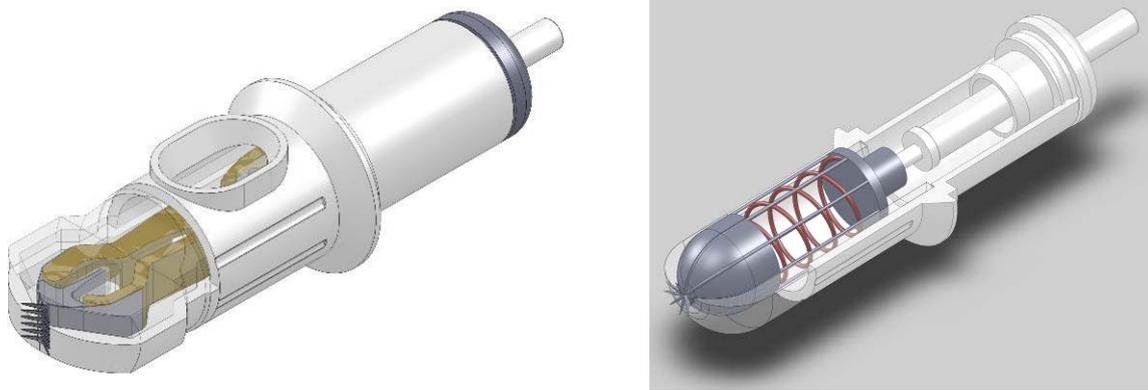


Abb. 4-76 CAD-Modulvarianten auf der Basis des Kammstechkonzepts

Ein wesentlicher Parameter für die Einstellung der Stechtiefe ist der Winkel der Stechwerkzeuge zur Hautoberfläche. Je kleiner dieser Winkel auf beiden Seiten ist, desto besser funktioniert das automatische Vorspannen, sofern die Nadeln an der Gewebeoberfläche greifen. Wird der Winkel steiler, nimmt einerseits der auf die Haut projizierte, verschiebende Anteil der Nadelbewegung ab und es verringert sich der vorspannende Effekt. Andererseits kann die einzelne Nadel tiefer ins Gewebe eindringen. Da es konstruktiv schwierig ist, den Winkel zwischen der Nadel und der Hautoberfläche variabel einstellbar zu gestalten, werden für einen festen Winkel zwei Keile vorgeschlagen, deren Hautauflagefläche im Querschnitt einen jeweils gleich großen Parallelversatz zur Nadelachse der Gegenseite aufweisen, vgl. Abbildung 4-77. Durch das symmetrische Verschieben der Keile auf einander zu oder umgekehrt lässt sich die Stechtiefe anpassen. Nachteilig dabei ist, dass der Hautauflagedruck beim Arbeiten erhöht werden muss, um durch die resultierende Hautwölbung ein sicheres Anliegen der Haut an den Keilflächen und vor den Nadelmündungen zu gewährleisten. Denkbar ist ein zusätzlich angelegter Unterdruck im Bereich der Nadelmündungen.

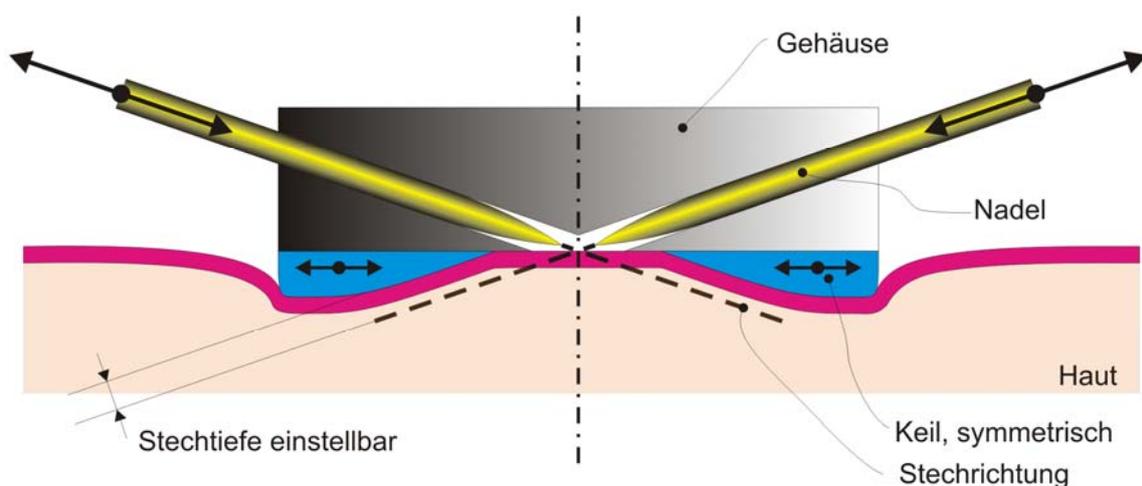


Abb. 4-77 Eine Möglichkeit für eine genaue Voreinstellung der Applikationstiefe: symmetrisch-horizontale Änderung des Abstands der Keile (blau)

Wegen der von der Stechgeschwindigkeit unabhängigen Wirkung des Kammstechverfahrens können neben den maschinell betätigten Varianten auch einfache Handgeräte aufgebaut wer-

den, z. B. eine entsprechend gestaltete Pinzette, welche z. B. in Spritzguss- oder Stanztechnik aus Kunststoff oder Blech herstellbar ist oder die in den Abbildungen 4-78 bis 4-80 gezeigten Varianten.

Dabei wird ein beidseits angeschliffenes und in frei gestalteter Schlaufenform (hier ringförmig) gebogenes Drahtstück als Nadelpaar verwendet. Dies kann bereits, wie in der Abbildung 4-78 gezeigt, als Handgerät verwendet, aber auch miniaturisiert und in ein Tätowiermodul mit zusätzlicher Führungsspitze integriert werden.

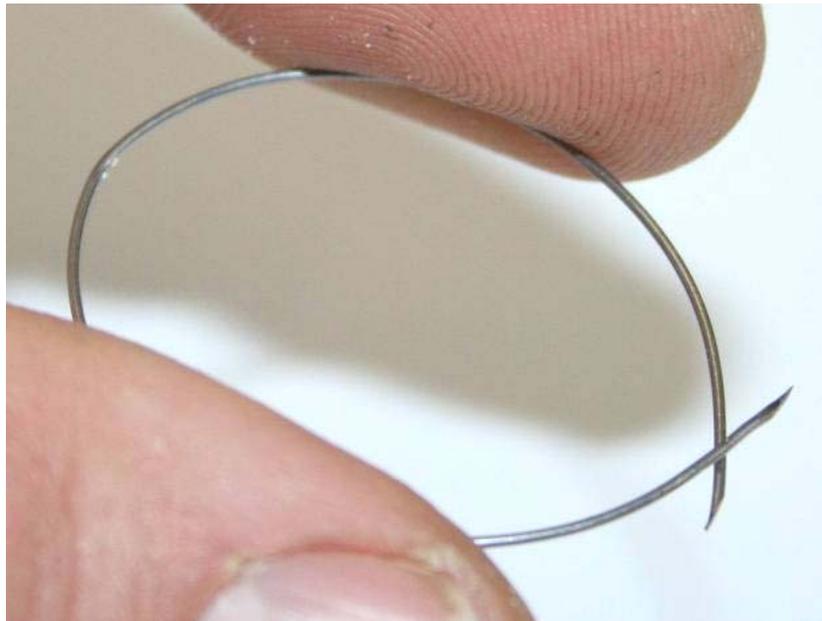


Abb. 4-78 Gestaltungsmöglichkeit für die einfache Herstellung eines Nadelpaares

Bei den in der Abbildung 4-79 gezeigten Ausgestaltungsvarianten wurde die so gestaltete Nadel um ein flaches, zweiteiliges Gehäuse erweitert, welches in Spritzgusstechnik hergestellt werden kann. Das obere Bild zeigt das geschlossene Gehäuse, darunter sind zwei mögliche Gestaltungsvarianten zu sehen: links sind die funktionellen Gehäusestrukturen auf nur einem Basisbauteil ausgeformt, welches um einen flachen Deckel ergänzt wird (nicht dargestellt). Rechts erkennt man eine Lösung, bei der zwei identische Bauteile verwendet werden, die sich erst im gefügten Zustand ergänzen und einen geschlossenen Raum im Inneren bilden, der als Vorratstank für eine zu applizierende Flüssigkeit dienen kann, wobei die Flüssigkeit im Bereich der Führungsspitze abgegeben oder bei Verwendung einer entsprechenden Kanülenanordnung auch aktiv injiziert werden kann. Um die Montage des Gehäuses zu vereinfachen und eine aufwendige Mehrteil-Positionierung zugunsten einer einzelnen Faltbewegung überflüssig zu machen, können beide Gehäusehälften in einem Spritzgussvorgang gefertigt und durch ein Flipscharnier verbunden sein, welches die richtige Positionierung automatisch bewirkt und dadurch insgesamt die Produktionskosten weiter minimiert.

In einem einzelnen Gehäuse ist zudem die Verwendung mehrerer Nadelpaare, statt wie dargestellt eines einzelnen, denkbar. Obwohl die Ausgestaltungsvarianten als „Handgeräte“ bezeichnet wurden, lassen sie sich ganz oder teilweise für eine maschinelle Betätigung modifizieren.

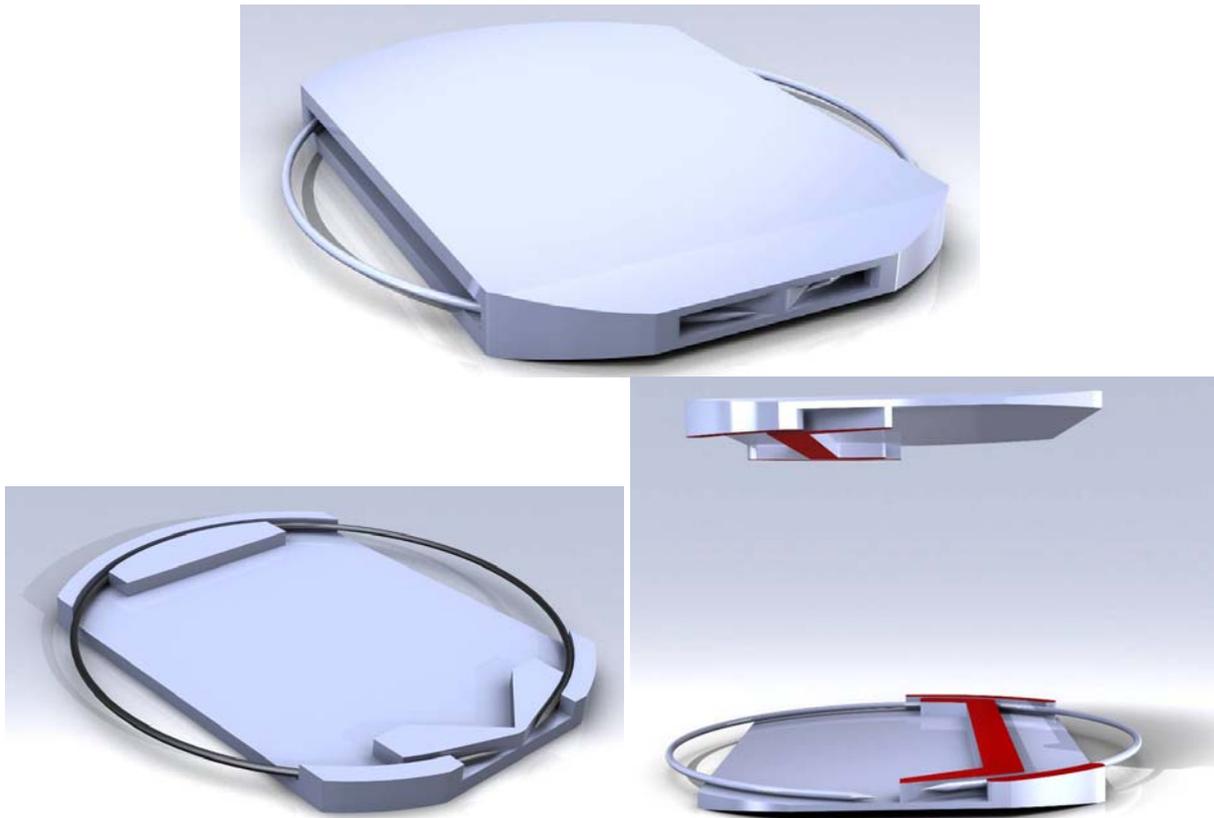


Abb. 4-79 CAD-Bilder eines Designvorschlags für ein Gehäuse, oben Gesamtansicht, unten links aus zwei unterschiedlichen (Deckel nicht dargestellt), unten rechts aus identischen Bauteilen aufgebaut (potentielle Fügeflächen rot)

Bei der Herstellung der Nadelanordnungen als Stanzteile kann so weit gegangen werden, dass das fertige (Hand-)Gerät aus einem einzelnen Stanzteil / Blechstreifen besteht. Dies verdeutlichen die in der Abbildung 4-80 gezeigten Designvorschläge. Dabei ist der rechts im Bild dargestellte Aufbau wegen der geringeren Packungsgröße möglicherweise günstiger, er benötigt dagegen mehr Biegeschritte als der Vorschlag links.

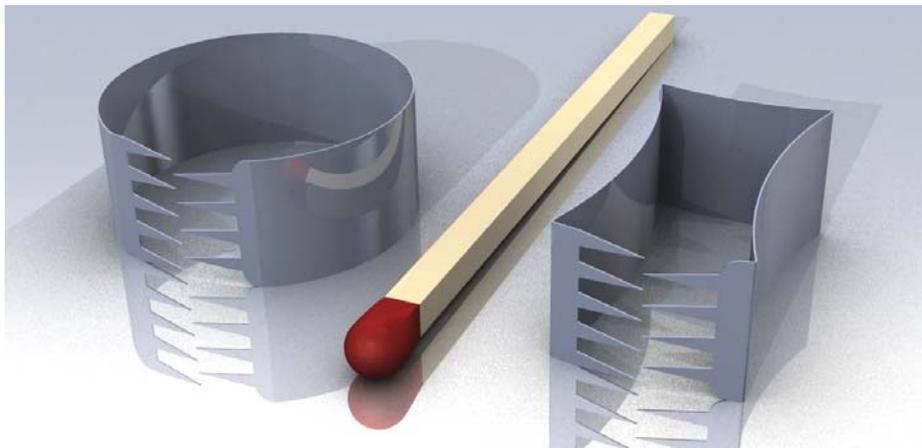


Abb. 4-80 CAD-Bild von Handgeräten, die als Stanz-Formteile herstellbar sind, im Vergleich zu einem Streichholz herkömmlicher Größe

Gegensätzlich sind für solche Handgeräte die Forderungen nach einer genügend großen Rückstellfederkraft einerseits, beispielsweise wenn sich das Handgerät selbsttätig öffnen soll,

vgl. Abbildung 4-80, was durch ein möglichst dickes Blech, enge Biegeradien und / oder kurze Kragbalkenlängen realisierbar ist. Andererseits verändern kurze Kragbalken den Weg der Werkzeuge bei der Betätigung ungünstig. Zudem ist ein möglichst dünnes Blech zu verwenden, um wegen der senkrechten Schnittrichtung beim Feinstanzen oder Laserfeinschneiden eine Spitze mit minimaler Stirnfläche zu erhalten.

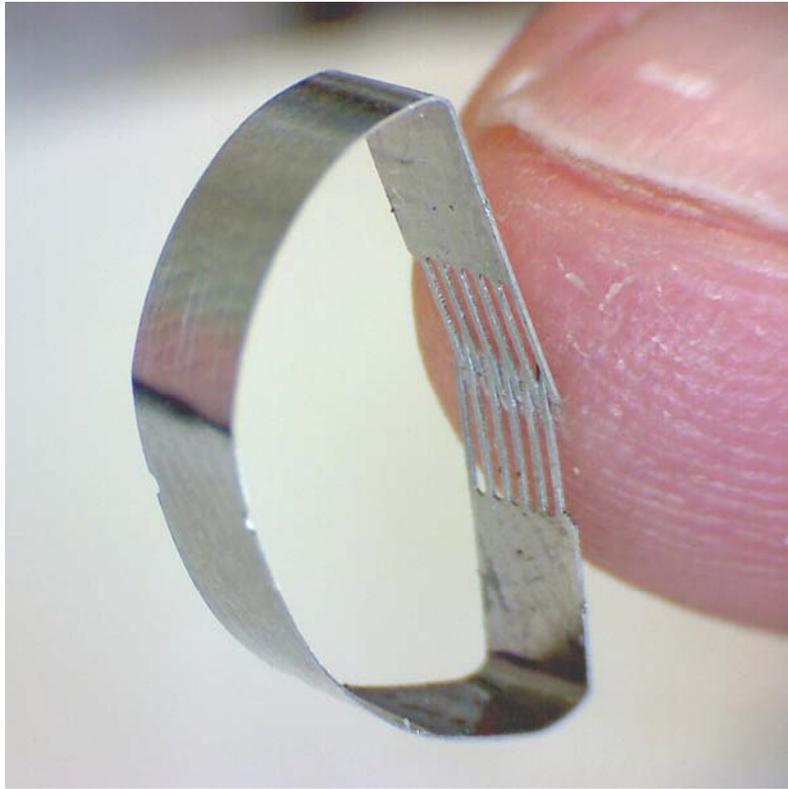


Abb. 4-81 Beispiel für die Verhältnisse bei zu geringer Rückstellkraft

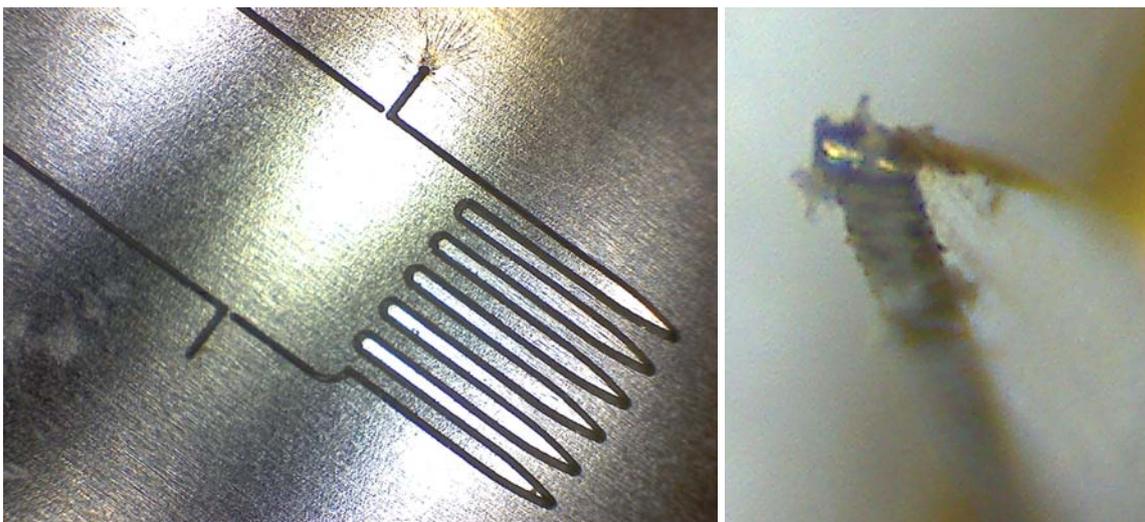


Abb. 4-82 Links ein 0,05 mm dickes Nadelblech als Rohteil, hergestellt mittels Laserfeinschneidens, rechts die Stirnkante einer Einzelnadel im Detail

Eine Variation des Verfahrens sieht als Werkzeuge Schneiden statt Nadeln vor, vgl. Abbildung 4-83. Dabei wurden die Vorteile des Kammstech-Verfahrens genutzt (vibrationsarm, hautvorspannungsfrei, einfacher Aufbau) und mit denen des Schneidverfahrens nach Loth et al. kombiniert [Loth08]. Das obige Prinzip kann, analog zum Kammstechverfahren, in ein maschinell betätigtes Gerät integriert werden.

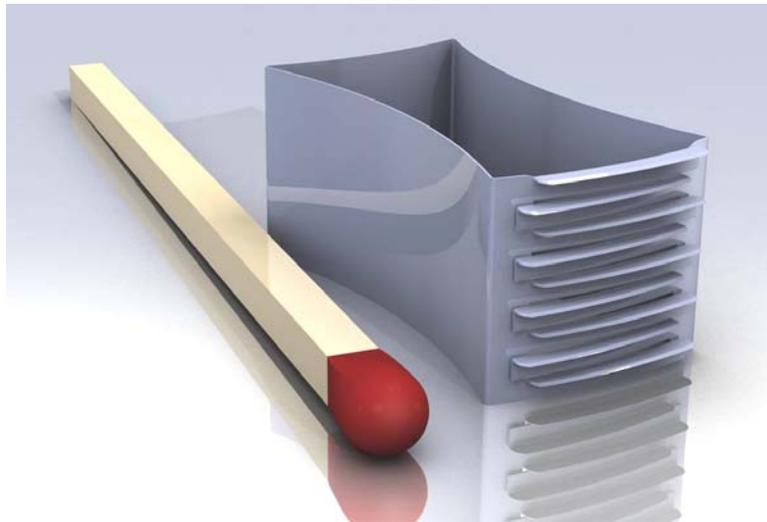


Abb. 4-83 CAD-Bild einer Kammschneiden-Ausgestaltungsvariante auf der Basis von Stanzteilen

Das Kammstechverfahren ist gut für den kosmetischen Bereich geeignet, da auch auf sehr elastischem Untergrund (Wangen, Bauch) und unabhängig vom Unterhautgewebe oder der Lokalisation der Behandlung der Wirkstoff ohne zusätzliche Hautvorspannung eingetragen wird. Dabei werden Vibrationen nur minimal übertragen, was bei herkömmlichen Verfahren durch das partielle Hautausweichen unvermeidbar ist. Damit ergeben sich in besonders sensiblen Hautbereichen Marktvorteile gegenüber anderen Verfahren, da lange einwirkende Vibrationen weit über die reine Behandlungsdauer hinausgehend vom Kunden als Missempfindung wahrgenommen und wenig toleriert werden.

Die vorgestellten, sehr einfachen Handgeräte eignen sich z. B. als manuelle Markier-, Impf- oder „Outdoor-Tätowiergeräte“. Modernste intrakutane Impfverfahren benötigen für ihre Markteinführung unter anderem Stechgeräte, die preiswert in der Herstellung (wenig Teile / Material, wenige Montageschritte), einfach zu handhaben und überall einsetzbar sind sowie zuverlässig arbeiten. Wegen der bereits mit den Labormodell-Versuchen demonstrierten guten Griffbarkeit des Verfahrens sind zudem Anwendungen denkbar, bei denen nicht der Eintrag von Substanzen in die Haut im Vordergrund steht, sondern die Befestigung von Gegenständen an der Haut.

Denkbar ist beispielsweise die Herstellung eines speziellen und möglicherweise hypoallergenen Pflasters, welches aus einer elastischen Trägerschicht besteht und statt der Klebeschicht eine Schicht aus einer Vielzahl von gerichteten oder ungerichtet flach liegenden kleinen Nadeln aufweist, die jedoch an ihrem stumpfen Ende mit der Trägerschicht verbunden sind. Wird die elastische Trägerschicht etwas gedehnt, auf die Haut aufgelegt und anschließend entspannt, sollte sich ein Verbund mit der Haut durch das Eindringen der Nadeln ergeben.

Zum Lösen muss die Trägerschicht lediglich über die vorherige Dehnung hinaus gedehnt und abgehoben werden. Wegen der geringen Eindringtiefe ist eine mehrmalige Verwendung beim gleichen Anwender denkbar. Als Anwendungsmöglichkeit könnte die Befestigung von orthopädischen Prothesen, Perücken oder anderer als Körperersatz dienender Gegenstände dienen, aber auch Schmuck, Werbemittel oder Bekleidungsgegenstände sind denkbar. Die Frage, inwieweit eine Langzeitbefestigung von Gegenständen an der Haut vom Organ Haut toleriert wird, bleibt bisher offen. Vorteilhaft wird gesehen, dass keinerlei Perforation von Blutgefäßen bei sehr guter Griffbarkeit beobachtet wurde. Dies ist ein Vorteil bei der Anwendung an Patienten mit Blutungsneigung.

4.2.3 Hautvorspannung durch passive Komponenten

Grundlage des in diesem Abschnitt beschriebenen Konzepts ist, dass durch das Hautausweichen während der Stechbewegung eine Wechselwirkung der Hautoberfläche mit passiven und in entgegen gesetzter Richtung wirkenden Strukturen erfolgt, die zu einer Vorspannung der Haut und damit zur Verhinderung der Hautausweichens führt. Ein Beispiel aus der Biologie für eine solche Struktur ist die Oberseite der Katzenszunge, siehe Abbildung 4-84.

Bildet man solche gerichtet wirkenden Strukturen auf der Hautauflagefläche eines flach stechenden Stechgeräts nach, ermöglicht dies einerseits ein leichtes Gleiten in der Arbeitsrichtung bzw. schräg seitlich dazu, während andererseits die Haut in Stechrichtung daran gehindert wird, der eindringenden Nadel zu folgen.

Eine solche gerichtete Wirkung erhält man beispielsweise durch flach eingesetzte Kurznadeln, hoch flexible Synthetik- oder Drahtbürsten (z. B. aus Nitinol®, Fusselbürstenstoff) oder Strukturen aus flexiblem Reibmaterial, ähnlich den Gummilippen an modernen Nassrasierern.

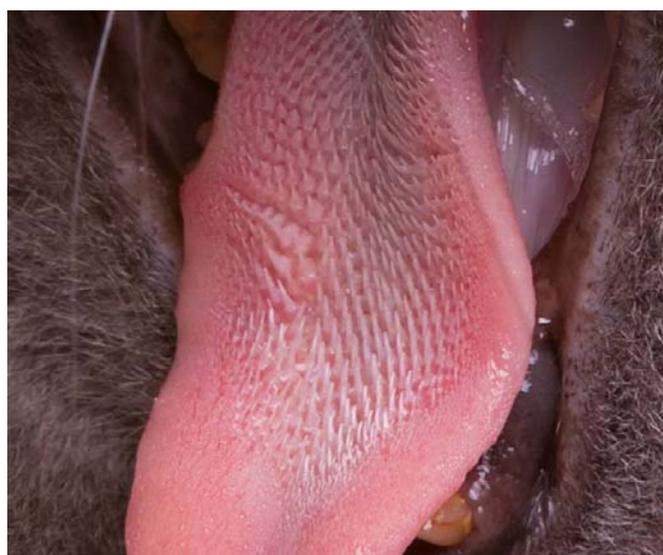


Abb. 4-84 Detailaufnahme einer Katzenszunge [KaLe11]

Wegen der für kosmetische Anwendungen unpraktikablen Einschränkung bei der Arbeitsweise durch gerichtet wirkende Strukturen wurden ungerichtet wirkende Reibstrukturen in An-

lehnung an Winterreifenprofile entworfen und untersucht. Hierzu wurden verschiedene Formen in POM gefräst, mit einer Silikonmischung abgeformt und untersucht, vergleiche die Abbildungen 4-85 und 4-86.

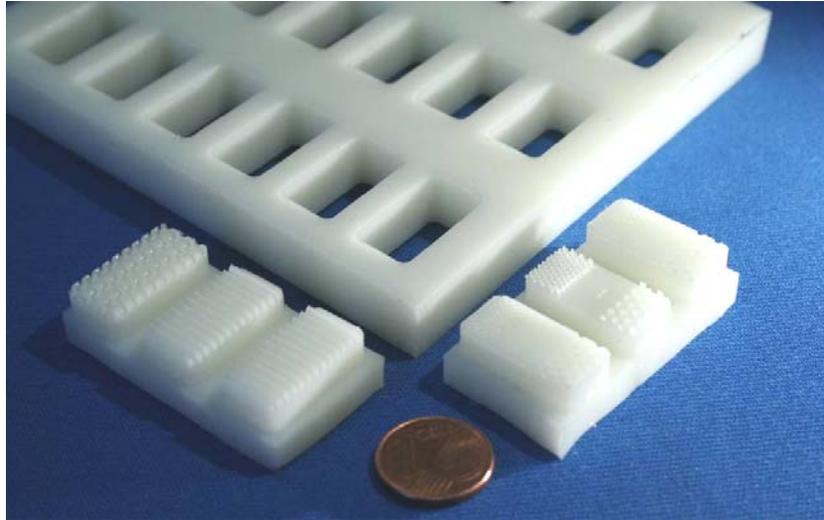


Abb. 4-85 Silikon-Gießform und Negativ-Formteile aus POM mit den Profil-Negativstrukturen



Abb. 4-86 Detailfoto der für Reibversuche in Silikon abgeformten Reibstrukturen

Die Silikonproben wurden in einem Rahmen derart montiert, dass die Reibfläche gegen eine mit 2-Isopropanol gereinigte PMMA-Platte, befestigt auf einer Dreiachs-Kraftmessplattform, gerichtet war. Zusätzlich wurden die Proben mit einem Stempel sowie einer definierten Masse ($m = 100 \text{ g}$) belastet und relativ zur PMMA-Platte in tangentialer Richtung mit definierter Geschwindigkeit unter Messung der auftretenden Kräfte verschoben, siehe die Abbildungen 4-87 und 4-88.

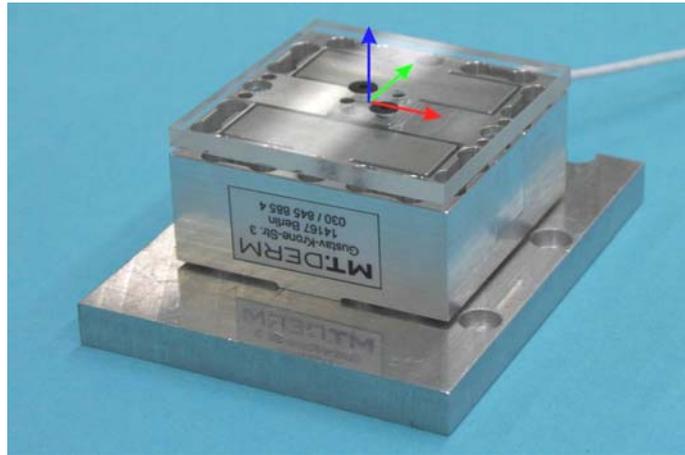


Abb. 4-87 Dreiachs-Kraftmessplattform mit Grund- und Deckplatte und ange-tragenem Koordinatensystem für die einzeln messbaren Achsen

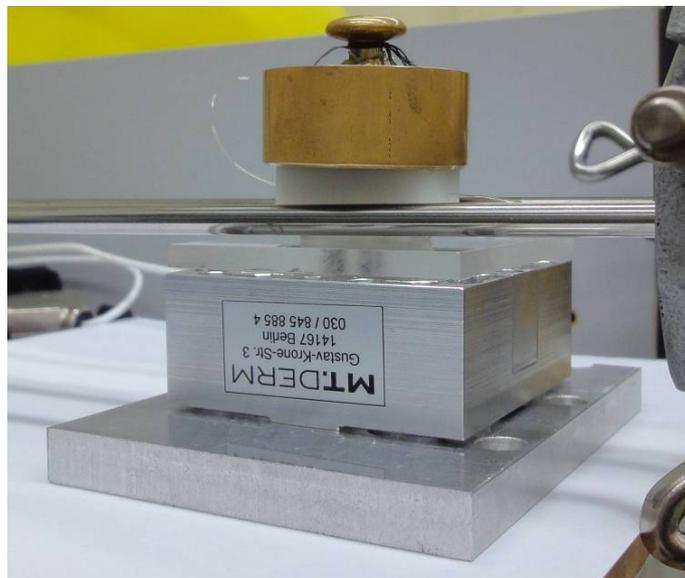


Abb. 4-88 Messungen mit der Dreiachs-Kraftmessplattform bei Reibversuchen mit definiert beschwerten Silikonproben

Bei den Versuchen ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Profilstrukturen und einer unstrukturierten Oberfläche erkennen, daher wurden die Versuche in diesem frühen Stadium abgebrochen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass solche Strukturen ohne Vorteil bezüglich der Verminderung des (tangentialen) Hautausweichens sind, dieser konnte lediglich mit dem beschriebenen Versuchsaufbau nicht herausgearbeitet werden.

Für die praktische Anwendung des Konzepts wurde als Designvorschlag ein Tätowiermodul-adapter entwickelt, der die unter einem flachen Winkel zur Hautoberfläche ausgeführte Stechbewegung gewährleistet und dabei die Spitze des Moduls beidseitig, ähnlich zweier gespreizter Finger, eng umgreift, was das Hautausweichen minimiert. Eine leichte konkave Wölbung der Auflagefläche in diesem Bereich verstärkt den Andruck der Reibflächen und damit die Wirkung der Fixierung zusätzlich. Die Gleit-Reibfläche ist gemäß den Versuchsergebnissen mit unstrukturiertem Silikon beschichtet. Die Hinterschneidungen im Adapterkör-

per dienen als Verzahnungen und bieten zusätzlichen Halt und eine Sicherheit gegen das Ablösen der Beschichtung bei starker Scherbelastung.



Abb. 4-89 Gleitfußadapters mit eingesetztem Stechmodul, CAD-Bild A. Loth, D. Scherkowski

4.2.4 Aufbringen einer Versteifungsschicht

Die Beschaffenheit der Haut eines Menschen ist nicht nur von seinem Alter, seiner Lebensphase oder seinem Ernährungs- und Pflegezustand, sondern auch von seinem Typus und seinem Lebenswandel abhängig. Sie muss primär als gegeben angesehen werden und ist nur bedingt beeinflussbar. Die Haut eines Kleinkindes ist sicher leichter zu punktieren als die sonnengegerbte Haut eines alten Menschen.

Eine Möglichkeit, die Haut ingenieurtechnisch und medizinisch vertretbar zu beeinflussen und damit das Hautausweichen beim Stechvorgang zu mindern, bzw. zu verhindern ist ganz allgemein das Versteifen der Haut, ohne einen zusätzlichen Einstechwiderstand zu erzeugen oder zusätzlichen Nadelverschleiß zu verursachen. Dies lässt sich durch das Aufbringen einer äußeren Versteifungsschicht aus geeignetem Material einfach realisieren.

Als eine solche Versteifungsschicht wurde in ersten Versuchen herkömmliches Klarsicht-Klebeband der Firma TESA® verwendet, indem deren Wirksamkeit in zwei Versuchsreihen auf vorgespannter und unvorgespannter Haut untersucht wurde. Ein Tätowiergerät stach eine einzelne Nadel mit etwa 100 Hz durch die Klebefolie in die Haut, wobei der Versuch mit einer Highspeed-Videokamera dokumentiert wurde. Anhand der Videoaufnahmen erkennt man eine deutliche Reduktion des Hautausweichens gegenüber der unfolierten Haut. Ein Erklärungsansatz für die Wirksamkeit des Konzepts ist, dass die erzielte Versteifung der Haut in erster Linie durch die Gleichschaltung aller benachbarter Hautmassenelemente unterhalb der Klebefolie und durch die Steifigkeit der Folie selbst erreicht wird, wodurch die träge Masse der Haut lokal scheinbar vervielfacht wird. Schließlich wird auch die elastische Reaktion der Haut verhindert, da die tangentielle Verschiebung der Hautzellen kaum mehr möglich ist.

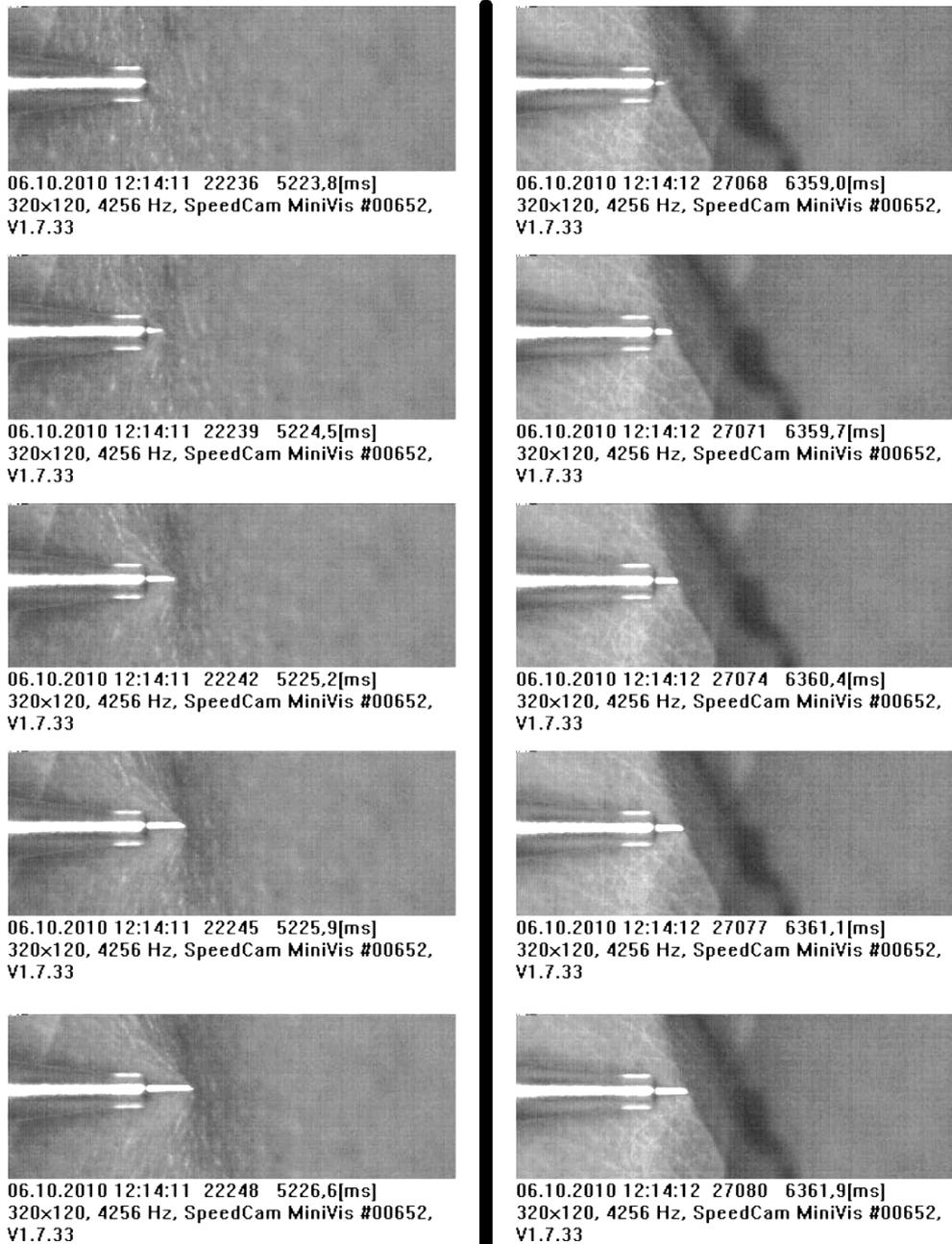


Abb. 4-90 Bildsequenzen zweier Highspeed-Videos vom senkrechten Stechen einer Tätowiernadel in unvorgespante Haut, links ohne und rechts mit aufgebracht Klebefolie

In der Abbildung 4-90 ist eine Sequenz von Einzelbildern gezeigt, die zwei Stechversuche auf unvorgespannter Haut wiedergeben. Man erkennt gut das Hautausweichen in der linken Bildreihe anhand des sich um die Einstechstelle bildenden Trichters. Wegen des relativ langsam stechenden Tätowiergeräts kommt es auch beim Stechen durch Klebefolie zum Hautausweichen, welches jedoch im direkten Vergleich der eingedrungenen Nadellänge deutlich geringer ausfällt.

Für die medizinische Anwendung ist die bei den Versuchen verwendete Klarsicht-Klebefolie aufgrund bisher fehlender Nachweise der physiologischen Unbedenklichkeit der Folie und der Klebeschicht nicht geeignet.

Anstatt dessen lassen sich Substanzen auftragen, die zunächst in flüssiger Form vorliegen und anschließend durch die Abgabe von Wärme (erstarrende Schmelze) oder eines Lösungsmittels oder durch eine chemische Vernetzungsreaktion erstarren. Insbesondere die chemisch vernetzenden Substanzen werden im medizinischen Bereich bereits als Wund- und Gewebekleber verwendet und benötigen keine zusätzliche Klebeschicht als Haftvermittler. Daher wurden Versuche mit einem verbreiteten Produkt durchgeführt, um die Praktikabilität und die Eignung als Hautversteifungsschicht für diese zweckfremde Anwendung zu bewerten. Dabei wurde festgestellt, dass solche medizinisch zugelassenen Gewebekleber kostenintensiv und aufgrund ihrer geringen Viskosität schlecht handhabbar sind. Besonders an abschüssigen Körperstellen ist das Anbringen einer Schicht mit genügender Versteifungswirkung praktisch nicht möglich. Zudem benötigen sie eine gewisse Zeit zum Aushärten, sind teilweise in flüssiger Form physiologisch bedenklich (Acrylat-Basis) und nicht für invasive Anwendungen zugelassen. Die Abbildung 4-91 dokumentiert den Versuch mit einem handelsüblichen medizinischen Gewebekleber. Man erkennt die umständliche Handhabung sowie die erzielte geringe Versteifungswirkung trotz hoher Schichtdicke.

Für die praktische Umsetzung des Konzepts wird daher empfohlen, eine Folie aus medizinisch zugelassenem und vom Körper abbaubarem Material zu verwenden, sodass bei der Stechbehandlung versehentlich eindringende Folienpartikel unkritisch sind. Als Klebstoff sind zähflüssige, hoch konzentrierte wässrige Lösungen von Kohlenhydraten ohne bekannte Intoleranzen denkbar. Vorteilhaft ist dabei, dass diese sich leicht mit Wasser entfernen lassen.

Dieses Konzept eignet sich besonders für flächige Anwendungen bei schwierigem Unterhautstatus. Zudem ist, bei entsprechendem Aufbau der Folie (Verbundfolie) oder beim Zusatz eines Indikators zur Klebeschicht, eine Anzeige der flächenbezogenen Stechdichte denkbar, beispielsweise durch eine Farbreaktion des Indikators auf den Kontakt mit dem Wirkstoff oder einem weiteren Inhaltsstoff, mit dem Nadelmaterial, mit der austretenden Körperflüssigkeit, mit der aktivierenden Schicht einer zwei- bis mehrschichtig laminierten Folie oder allein durch die mechanische Belastung. Denkbar ist auch eine veränderte Fluoreszenz der Folie im Bereich der durch die eindringende Nadel mechanisch beanspruchten oder durchstoßenen Folie beziehungsweise die Verwendung der Folie als flächiger Lichtleiter.



Abb. 4-91 Oben Gewebekleber auf Acrylat-Basis nach dem Auftragen, Mitte nach forcierter Aushärtung durch Benetzung mit Wasser, unten Test der Versteifungswirkung

4.3 Ansatz: Verringerte Interaktion zwischen Nadel und Haut

Um die vorgegebene Penetrationstiefe beim Stechen in ein Gewebe wie Haut möglichst genau zu erreichen, kann weiterhin der Ansatz verfolgt werden, die beim Stechen in Haut auftretenden Wechselwirkungen zwischen der eindringenden Nadelanordnung und der Haut zu minimieren. Im Idealfall dringt die Nadel wechselwirkungsfrei in das Gewebe ein. Dabei müsste sich der Stechkanal nach dem initialen Kontakt der Nadelspitze mit der Hautoberfläche selbstständig öffnen und im weiteren Vordringen der Nadel keinerlei Reibung zwischen der Nadelaußenfläche und der Stechkanalwand bzw. der sich anlegenden Gewebeflächen auftreten. In der Praxis lassen sich vor allem Modifikationen an der Nadel und der Wirkstofflösung zur Minimierung der Reibung wirtschaftlich umsetzen. Die Tabelle 4-2 stellt einige primäre (unmittelbare) Parameter der Nadel-Haut-Interaktion in einer Übersicht zusammen. Nicht darin enthalten sind bereits diskutierte primäre Parameter, z.B. die Beeinflussung der Hautelastizität und sekundäre Parameter, die beispielsweise aktorseitig die Stechbewegung und -geschwindigkeit in ihrem zeitlichen Verlauf beeinflussen.

Reibung ist im makroskopischen Bereich eine Interaktionsform zweier Oberflächen und nicht vom Flächeninhalt der interagierenden Flächen abhängig, sondern lediglich von der Größe der Normalkraft und von der Materialpaarung sowie von der Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner.

Im mikroskopischen Bereich, insbesondere beim Vorhandensein von fluidvermittelten Ad- und Kohäsionseffekten erlangen Oberflächeneffekte eine große Bedeutung beim Entstehen von Flächeninhalt-proportionaler Haftkraft. Daher werden auch die Nadeloberfläche verändernde Parameter betrachtet.

System	Parameter	Beschreibung	gewünschte Tendenz	Innovationspotenzial
Aktor	Nadelgeschwindigkeit = $f(t)$	zeitlicher Verlauf der Stechbewegung	schneller veränderlich	k.A.
Nadel	Nadelspitzengeometrie	je kleiner der Spitzenwinkel, desto weniger Kraft wird zum Erreichen einer Stechtiefe benötigt	spitzer	+
		bei höchsten Geschwindigkeiten ist eine gerundete Nadelspitze günstig für das selbsttätige Öffnen der Haut (Stoßwelle, Spalt statt Loch) [Mayn05]	optimierte Form	0
	Nadelquerschnittsprofil	die äußere Interaktionsfläche kann durch geeignete Querschnittsform der Nadel (z.B. längst gewellte Oberfläche) verringert werden	k.A.	+
	Nadeldurchmesser	je dünner die Nadel, desto geringer muss die durch die Spitze punktuell erzeugte Öffnung gedehnt werden, um die weiter vordringende Nadel passieren zu lassen	geringer	0
	Nadelanordnung (seitlicher Abstand)	je weniger sich der Wirkbereich zweier eindringender Nadeln überschneidet, desto weniger weicht das Gewebe aus	größer	0
	Nadeloberfläche	durch eine gezielte Texturierung kann die Mikrooberflächenstruktur verändert werden, sodass eine geringere Adhäsionswirkung auftritt	k.A.	+++
durch eine Beschichtung oder Oberflächenbehandlung werden die Reibkoeffizienten und die Adhäsionseffekte (Benetzung) verändert		k.A.	+++	
Zusatzstoff	Benetzung Rheologie Mehrphasensysteme Zusammensetzung	durch gezieltes nanoskopisches Design werden die Effekte günstig beeinflusst (Benetzung, dynamische Viskosität), z.B. durch: kugelförmige oder beschichtete Pigmente, zugesetzte Gleit-substanzen, Molekülaufbau wie bei Gleitschmierstoffen, Fließeigenschaften Nicht-Newton'scher Fluide	k.A.	+++
Haut	Hautbeschaffenheit	durch die gezielte Beeinflussung der Hautbeschaffenheit wird das Ein- und Vordringen der Nadel begünstigt	k.A.	k.A.

Tabelle 4-2 Parameter der Nadel-Haut-Interaktion, 0 = kein Potenzial, +++ = großes Potenzial

Teils stehen die vorgeschlagenen Ziele im Widerspruch zu den mechanischen Forderungen oder den wirtschaftlichen Aspekten. Beispielsweise wirft eine sehr spitze Nadel Probleme bei

der Montage in einem Modul auf. Des Weiteren wird bei solchen Nadeln beim Zurückziehen der eingestochenen Nadel ein schneller Wundverschluss erzielt, sodass der passive Wirkstoffeintrag in den eröffneten Stechkanal gegenüber einem sich verzögert schließenden Kanal bei einer Nadel mit größerem Spitzenwinkel vermindert ist. Daher muss die flächenbezogene Stechkanaldichte steigen. Auch Hohnadeln lassen sich nur bedingt verkleinern, da die zu applizierenden Wirkstofflösungen meist eine erhöhte Viskosität aufweisen. Um eine gleiche Wirkstoffmenge je Fläche zu applizieren, müssen bei verkleinerten Hohnadeln mehr Nadeln, eine größere Nadeldichte, ein überproportional höherer Fluiddruck und / oder eine höhere Konzentration des Wirkstoffs in der Lösung realisiert werden.

Um die Nadel-Haut-Interaktion aktorseitig zu beeinflussen, besteht die Möglichkeit, die Stechbewegung in ihrem zeitlichen Verlauf zu modifizieren. Dabei sollen die auftretenden Haft- und Reibeffekte durch eine gezielt-wiederholt unterbrochene oder veränderte Vorschubbewegung der Nadel vermindert werden. Die Idee dieses Ansatzes ist, die lineare Stechbewegung durch eine mechanische Axial-, eine Radial- und / oder eine Drehschwingung zu überlagern.

Bereits zuvor haben andere Arbeitsgruppen diesen Ansatz für die einmalige Hautpunktion, insbesondere zur Gewinnung einer Blutprobe, untersucht. Als Beispiel sei das Patent [Boeh97] angeführt, in dem vorgeschlagen wird, durch flaches, langsames Schneiden auf kurzer Schnittlänge bei überlagerter Schwingung die Schmerzempfindung bei der Blutprobengewinnung deutlich zu mindern.

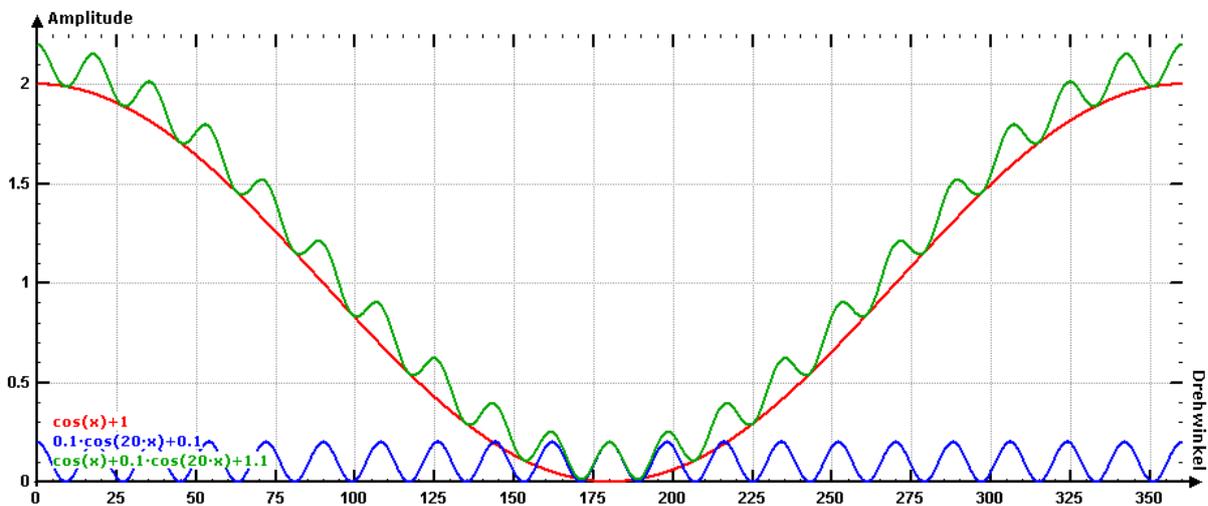


Abb. 4-92 Überlagerung zweier Schwingungen (rot, blau) zu einer Gesamtschwingung (grün), erstellt mit [Zorn12]

Eine Überlagerung mit einer Axialschwingung kann bei der Verwendung von Linearmotoren für die Erzeugung der Stechbewegung (auch bei Spindeltrieb-Schrittmotoren) besonders einfach durch eine modifizierte Steuersoftware realisiert werden. Radiale und Drehschwingungen lassen sich beispielsweise durch zusätzlich längs angeordnete Reliefstrukturen erzeugen, die waschbrettartig überfahren werden und dabei auf die Nadelanordnung eine auslenkende Kraft wirkt. Wird eine solche Struktur doppelt-diametral mit seitlichem Versatz angeordnet und entsprechend abgetastet, so erhält man über das entstehende Kräftepaar ein schwingendes

Drehmoment, welches gegen ein elastisches Rückstellmoment wirkt. Alle Schwingungen lassen sich auch durch zusätzlich angebrachte Aktoren überlagern.

Besonders im experimentellen Stadium der Entwicklung bieten sich hier Piezo-Aktoren an, da sie leicht zu steuern sind und praktisch jede Form von Schwingung in freier Kombination untersucht werden kann. Nachteilig sind die geringen erzielbaren Amplituden, das lediglich geringe Vielfache der Arbeitsfrequenz bei großhubigen Piezoaktoren bis zu 1.000 Hz gegenüber der Stechfrequenz von 150 Hz, der hohe Anschaffungspreis und deren Baugröße.

Bei Vorversuchen wurde ein individuell aufgebauter und mitbewegter Piezoaktor zwischen einer Standardkanüle 30G und dem Kolben des in der Abbildung 4-3 gezeigten Spindelaktors befestigt. Durch die starre Form der Spindel wurde sichergestellt, dass die elektrisch erzwungene Dickenschwankung des Piezoaktors vollständig der Nadelbewegung überlagert wird. Die Stechversuche wurden alternierend mit aktivem und passivem Piezoaktor wiederholt und subjektiv bezüglich der Schmerzreduktion sowie der Minderung des Hautausweichens im Videobild einer Hochgeschwindigkeitskamera bewertet. Die Versuche ließen keine signifikanten Unterschiede erkennen. Darauf basierend lassen sich zwei Hypothesen aufstellen: erstens, der vom verwendeten Piezoaktor abgegebene mechanische Hub ist zu gering, die Methode funktioniert mit einem größeren Hub, zweitens, die Annahme, dass sich mit einer axialen Schwingungsüberlagerung die Wechselwirkungseffekte beim Stechen in Haut verringern lassen, ist falsch.

Ausgehend von der ersten Annahme wurde nach einer Möglichkeit gesucht, eine axiale Schwingung mit im Vergleich zum verwendeten Piezoaktor größerer Amplitude sowie ohne zusätzlichen Aktor und damit von der gewählten Stechfrequenz unabhängig überlagern zu können.

Dafür wurde das Prinzip der Erzeugung von Axialstößen bei einer Schlagbohrmaschine adaptiert. Die Abbildung 4-93 zeigt das Schlagwerk eines demontierten Akkuboehrschraubers. Wie man anhand der beiden Zahnscheiben erkennt, werden beim abgebildeten Schlagwerk je Umdrehung elf Schläge ausgeführt. Diese Anzahl ist für ein Stechgerät viel zu gering, da je nach Stechtiefe auf die Phase der Nadel-Haut-Interaktion tatsächlich maximal ein bis zwei Schläge entfallen würden. Daher wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Schlagzahl je Umdrehung deutlich zu erhöhen, ohne die Anzahl der Zähne wesentlich zu steigern. Mehr Zähne auf gleichem Umfang bedeutet eine Verkleinerung der Zähne zu Lasten der Stabilität und Belastbarkeit.



Abb. 4-93 Demontiertes Schlagwerk eines Akku-Bohrschraubers

Es wurde die Idee der Noniusteilung aufgegriffen und mit einem natürlichen Faktor n für die Anzahl der gleichzeitig tragenden Zähne beaufschlagt. Der Umfang der Zahnscheiben teilt sich demnach in n gleiche Bogenstücke, wobei auf jedem dieser Bogenstücke neun Zähne bei der Geberscheibe und zehn Zähne bei der Nehmerscheibe ausgebildet sind. Damit sind auf dem Gesamten Kreis gleichzeitig lediglich n Zähne im Eingriff. Für den experimentell aufgebauten Schlagaktor wurde $n = 3$ gesetzt, so dass sich eine Zähnezahl $z_1 = 27$ für die Geber- und $z_2 = 30$ für die Nehmerscheibe ergibt.

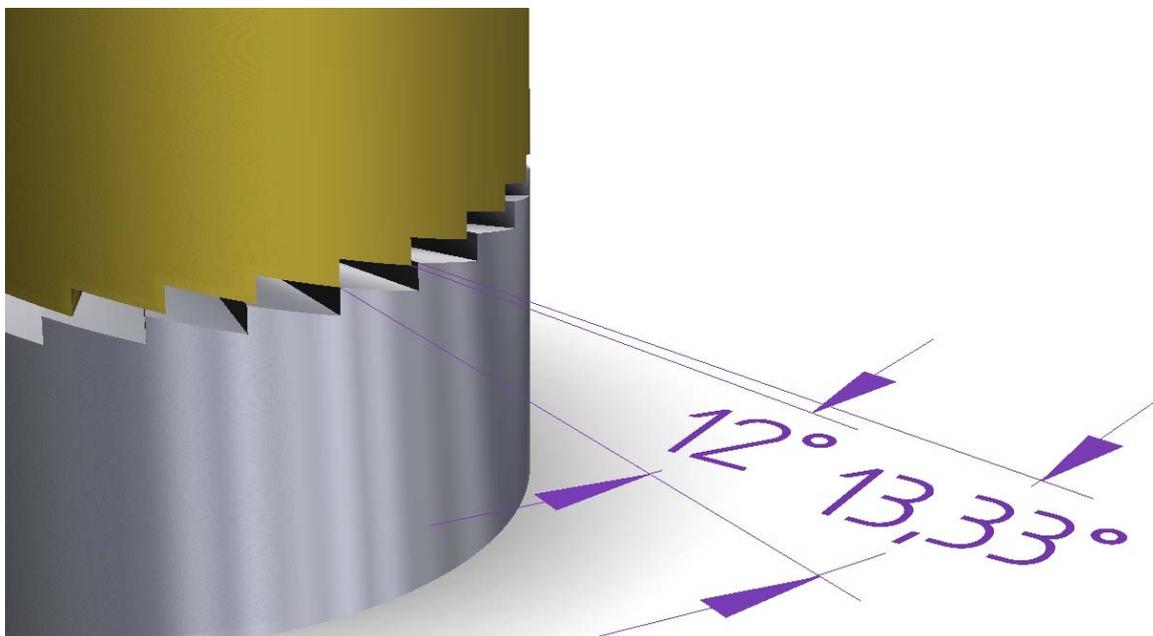


Abb. 4-94 Skizze der Winkelverhältnisse an Geber- und Nehmerscheibe des Schlagaktors unmittelbar vor einem Schlagvorgang (man beachte das Zahnpaar mit der Bezugsmaßhilfslinie)

Die Abbildung 4-94 verdeutlicht die Verhältnisse beim Schlagaktor. Die Geberscheibe ist silberfarben mit einem Drehsinn gegen den Uhrzeiger dargestellt (Verzahnung wirkt als Sperrklinke). Auf eines der drei Geber- bzw. Nehmerscheibensegmente ($n = 3$) entfallen 120°

(= $360^\circ / 3$). Damit ergibt sich der Winkel zwischen zwei Zähnen der Neunerverzahnung zu $13\frac{1}{3}^\circ$ (= $120^\circ / 9$), der Zehnerverzahnung zu 12° (= $120^\circ / 10$). Die geringe Differenz von $1\frac{1}{3}^\circ$ zwischen beiden Winkeln entspricht gerade dem Drehwinkel für einen einzelnen Schlag, was einer Anzahl von 270 Schlägen je Umdrehung entspricht, sodass eine deutliche Steigerung der Schlagzahl erzielt wurde. Die Schlaghöhe kann über trigonometrische Beziehungen berechnet werden und betrug beim Aufbau des Schlagaktors etwa 0,1 mm. Damit ist der erzeugte Hub etwa 30fach höher als der beim Piezoaktor.

Das Gehäuse wurde aus PMMA gefertigt, um die Vorgänge im Innern mit einer Hochgeschwindigkeitskamera im laufenden Betrieb beobachten zu können. Die Geber- und Nehmerscheibe wurden aus Silberstahl gefertigt und anschließend gehärtet und vergütet. Für den Antrieb wurde eine Kurvensteuerung mit einem Kugellager als Rolle verwendet. Die Abbildung zeigt den einsatzbereiten Schlagaktor mit montierter Standardkanüle 30 G (Farbcode gelb).



Abb. 4-95 Schlagaktor, zur besseren Beobachtung in einem PMMA-Gehäuse aufgebaut

Die Versuche mit dem Schlagaktor zeigten in den Highspeed-Videoaufnahmen ebenfalls keine signifikante Verbesserung beim Einstechverhalten der Kanüle in Haut. Subjektiv wurde eine leichte Verminderung des Schmerzempfindens berichtet. Mit diesen Ergebnissen konnte die erste Hypothese wegen der möglicherweise noch zu geringen Amplitude der überlagerten Schwingung zwar nicht bestätigt, jedoch auf der Grundlage dieser einfachen Versuche auch nicht zuverlässig widerlegt werden.

Die anderen Formen der Schwingungsüberlagerung sowie deren Kombinationen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, sodass keine abschließende Aussage über die Wirksamkeit des Ansatzes gemacht werden kann.

4.4 Ansatz: Kompensation des Hautausweichens

Bei diesem Vorgehen wird das Ausweichen der Haut durch begleitende Maßnahmen beim Stechvorgang kompensiert. Hierbei werden eine aktiv-geregelte, eine aktiv-gesteuerte und eine passive Kompensation unterschieden.

Bei der aktiv-geregelten Kompensation wird die Position der Nadelspitze relativ zur Hautoberfläche mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen, aus den Messwerten die aktuelle Eindringtiefe ermittelt und mit dem Vorgabewert verglichen. Darauf basierend wird die Bewegung der Nadel beeinflusst. Hierfür sind schnelle Mess-, Regel- und Effektorglieder ohne Neigung zur Regelschwingung notwendig, damit die Stechbewegung in Echtzeit und kontrolliert ausgeführt wird. Bei der Umsetzung dieses Ansatzes mit einem hochfrequent oszillierenden Stechgerät gestalten sich die Auswahl eines zuverlässigen Messverfahrens für die Nadel- und Hautposition und der Aufbau eines in Echtzeit steuer- bzw. -regelbaren Aktors besonders kritisch. Dies ist mit heutigen Verfahren nicht praktikabel realisierbar.

Bei einer aktiv-gesteuerten Kompensation werden über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMI) die Sollwerte für die Stechtiefe und die Stechfrequenz sowie ergänzende Informationen übermittelt. Zuvor wurden in einer Reihe von Experimenten oder über ein analytisches Modell Stützstellen für ein mehrdimensionales Kennfeld im Speicher hinterlegt, welches die multifaktorielle Abhängigkeit des Hautausweichens von Parametern wie der Nadelkonfiguration, des Nadelherausstands, der Stechfrequenz, des Hauttyps, der Lokalisation und anderer wiedergibt. Aus den Vorgaben und dem Kennfeld werden die notwendigen Einstellungen ermittelt und am Stechgerät über Stellglieder realisiert. Während der Penetrationsbehandlung wird keine Messung vorgenommen, daher handelt es sich um einen gesteuerten Prozess. Kritisch hierbei ist, neben den vielen individuell abhängigen Einflussgrößen, auch die Arbeitsweise mit dem Stechgerät, beispielsweise die Vorspannung der Haut oder der Winkel und der Abstand der Nadeldüse zur Hautoberfläche.

Unter einer passiven Kompensation wird hier eine Stechtiefenbegrenzung verstanden. Dabei wird auf der Nadel ein die Stechtiefe begrenzender Anschlag angebracht, der einerseits beim Erreichen einer vorgegebenen Stechtiefe das weitere Vordringen der Nadel bezüglich der die Nadel umschließenden Hautoberfläche verhindert. Darüber hinaus hat die Stirnfläche idealerweise keine Wirkung auf die Hautfläche. Die weitere Bewegung der Nadel erfolgt im Verbund mit der unmittelbar umgebenden Haut und ohne Relativbewegung beider zueinander.

Bei einer Stirnfläche mit zu großem Durchmesser berührt die äußere Kante die Fläche des Hauttrichters, bevor die Nadel mit ihrer gesamten freien Länge in die Haut eingedrungen ist. Dadurch wird das Eindringen vorzeitig beendet, die vorgegebene Stechtiefe wird nicht erreicht. Bei einer zu kleinen Stirnfläche wirkt die Begrenzung nicht, und die Nadel dringt versehentlich tiefer in die Haut ein.

Prinzipiell kann die Stechtiefenbegrenzung festgelegt oder vom Anwender variabel einstellbar sein. Die erstgenannte Variante ist besonders praktisch für Massenartikel mit bekannter Applikationstiefe. Man denke hierzu beispielsweise an zwei oben beschriebene Anwendungen: das intradermale Impfen sowie der Allergietest nach Prick. Die variable Variante ist besonders praktisch für medizinisch-kosmetische Behandlungen, wie die Mesotherapie oder die Narbenbehandlung.

Für die Versuche hierzu wurde, wie in der Abbildung 4-96 schematisch gezeigt, ein variabel einstellbares Modul entwickelt, das es erlaubt, durch einfaches Drehen der Modulspitze die freie Nadellänge zu verändern. Dadurch lässt sich der Stechtiefenbegrenzer zu dem verdreh-

gesicherten, jedoch für die Stechbewegung axial beweglichen und die Nadel tragenden Stößel über ein die Relativposition beider zueinander bestimmendes Gewinde im laufenden Betrieb verschieben. Der Nadelhub des Stechaktors bleibt davon unberührt. Die Abbildung zeigt den Stößel jeweils in der Stellung maximaler Stechtiefe, jedoch mit unterschiedlichen Stechtiefeneinstellungen.

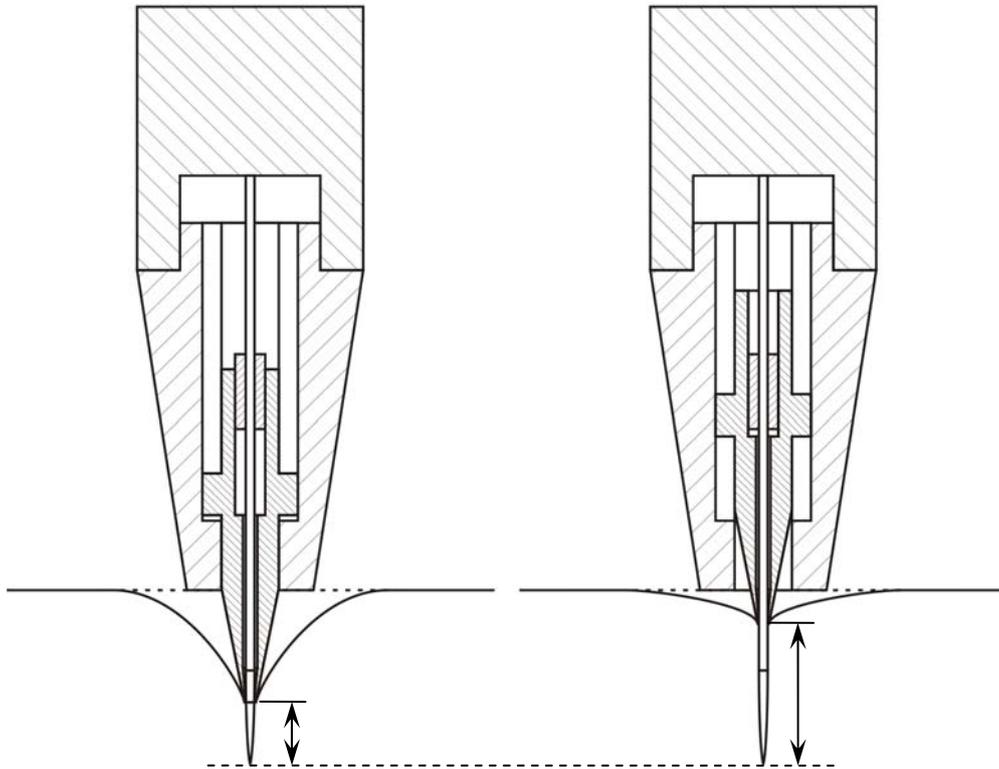


Abb. 4-96 Prinzipielle Wirkung einer einstellbaren Stechtiefenbegrenzung bei festem Nadelhub

Der die Stechtiefe begrenzende und mitgeführte Anschlag ist im experimentellen Aufbau für eine Ein-Nadel-Variante ausgelegt, kann jedoch auch für ein Mehrkanülenkonzept adaptiert werden.

Die Abbildung 4-97 zeigt ein modifiziertes Tätowiermodul als CAD-Entwurf, welches über eine einstellbare Stechtiefenbegrenzung verfügt. Die Form der Stirnfläche des Stechtiefenbegrenzers wurde entsprechend den obigen Betrachtungen modifiziert: eine minimale Kreisringfläche geht in eine kegelförmige Wand über, deren Spitzenwinkel geringfügig kleiner als der des Hauttrichters beim kräftigen Ansetzen einer einzelnen stumpfen Nadel ist.



Abb. 4-97 Modifiziertes Tattoomodul mit einstellbarer Stechtiefenbegrenzung, CAD-Bild: A. Loth

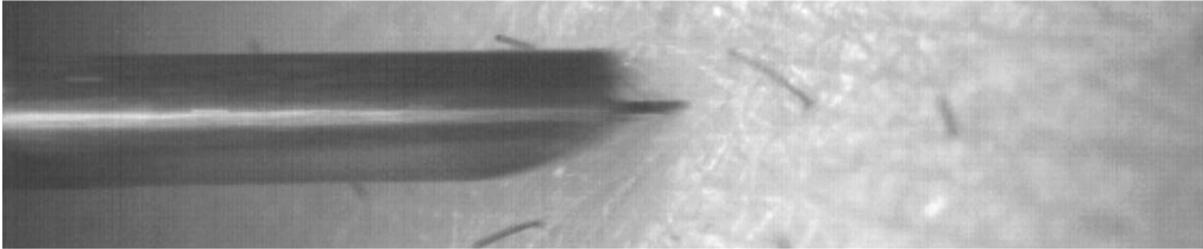
Der Gewinde tragende Teil des Stößels ist rot, das Standard-Modulgehäuse grün hervorgehoben. Man erkennt gut die in der transparent dargestellten Moduls Spitze diametral angeordnete Gleitnut für die Führungsnocken des hier weiß dargestellten Stechtiefenbegrenzers. Die Teile eines fertigen Prototyps für Stechversuche zeigt die Abbildung 4-98.



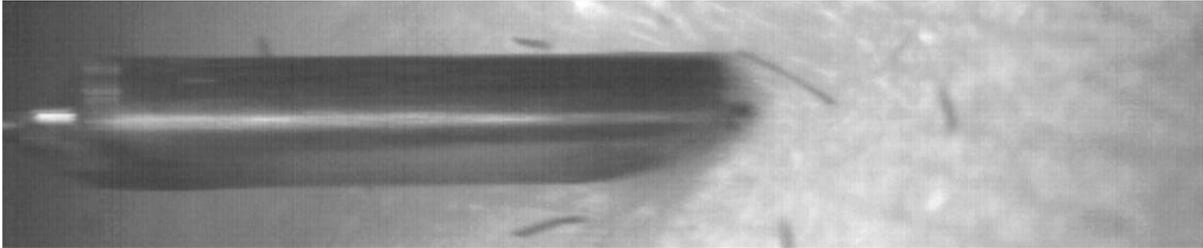
Abb. 4-98 Einzelteile eines Modul-Prototypen mit einstellbarer Stechtiefenbegrenzung, Foto: A. Loth

Für eine grundlegende Versuchsreihe wurden einfache und festgelegte Stechtiefenbegrenzer aus schräg angeschliffenen Kanülenrohren hergestellt und mit bestimmtem Abstand zur Nadelspitze auf Kanülen Durchmesser 0,3 mm x 12 mm (30 G x 1/2“) und auf einzelne Tattoomodul-Nadeln gelötet. Die freie Länge der Nadel wurde durch den Stechtiefenbegrenzer derart verkürzt, dass sie mit 0,7 mm unterhalb dem beim Ausweichen unvorspannter Haut zurückzulegenden Weg lag. Anschließend wurden diese Nadeln unter flachem und senkrechtem Winkel zur Hautoberfläche sowie mit dem Sprungaktor und dem Querkurbeltrieb-Prototyp getestet. Die Versuche wurden mittels einer Highspeed-Kamera dokumentiert und anschließend ausgewertet. Die Abbildung 4-99 zeigt Standbilder aus dem Videobildmaterial.

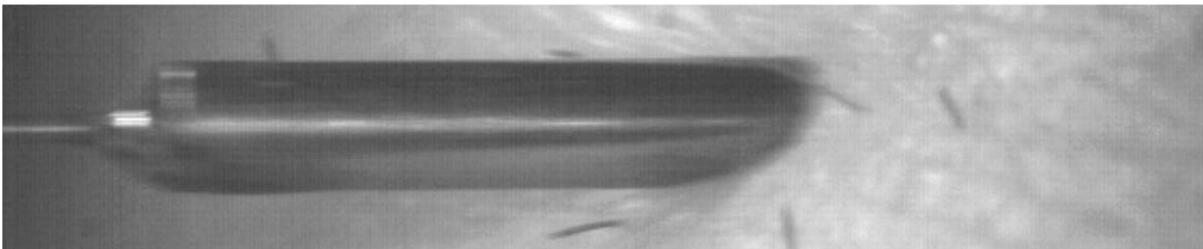
Die Nadel konnte bei allen Versuchen trotz unvorspannter Haut vollständig mit ihrer freien Länge eingestochen werden. Die Reserve im Hub der getesteten Stechaktoren gewährleistete das sichere Erreichen der eingestellten Stechtiefe und das vollständige Kompensieren des Hautausweichens.



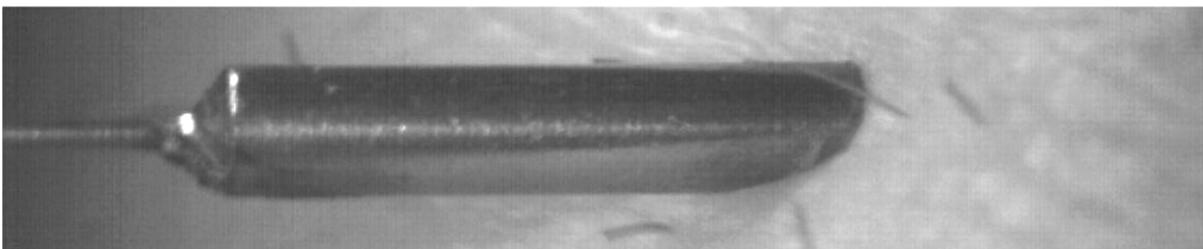
21.12.2010 10:10:15 1429 0329,7[ms] 560x118, 4328 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



21.12.2010 10:10:15 1432 0330,4[ms] 560x118, 4328 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



21.12.2010 10:10:15 1434 0330,9[ms] 560x118, 4328 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



21.12.2010 10:10:15 1436 0331,3[ms] 560x118, 4328 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33

Abb. 4-99 Einzelbilder eines Highspeed-Videos zeigen die Verhältnisse beim flachen Stechen einer Kanüle mit festem Stechtiefenanschlag mittels Sprungaktor in unvorgespannte Haut

4.5 Ansatz: Schwingfähiges System „Haut“ erschließen

Im Unterschied zu anderen vorgestellten Konzepten wird das Ausweichen der Haut, bzw. ihre vertikale und tangentielle Beweglichkeit in das Konzept mit einbezogen. Es bildet eine Voraussetzung für die unten vorgestellten Lösungsansätze. Dieses Konzept sieht vor, die insbesondere beim oszillierenden Stechvorgang durch die Wechselwirkung der Nadeln mit der Haut erfolgende Anregung der Haut zur Schwingung und die Ausbreitung von Oberflächenwellen durch eine optimale Wahl der Parameter vorteilhaft in die Dynamik der Stechbewegung einzubeziehen.

Es wurden zwei Lösungsansätze erarbeitet, einer davon näher untersucht. Beim ersten wird vorgeschlagen, dass das Stechen in die Haut zeitoptimiert erfolgt. Die Arbeitsfrequenz eines Stechgeräts lässt sich üblicherweise leicht ändern. Die beim Stechvorgang entstehenden Oberflächenwellen der Haut lassen sich durch einen annähernd tangentialen Lichteinfall eines Stroboskops sichtbar machen. Gut zu erkennen ist die vom zeitlich veränderlichen lokalen Neigungswinkel jedes Hautoberflächenelements abhängige Beleuchtung bzw. Verschattung, die Beobachtung der Wellenausbreitung lässt, abhängig von der Frequenz der Stroboskopbeleuchtung und der Stechbewegung sowie vom Zeitpunkt der Abgabe des Lichtblitzes Rückschlüsse auf die gewählte Stechfrequenz zu.

Bei der punktförmigen, impulsartigen Anregung einer ruhenden Oberfläche eines schwingfähigen Systems schwingt dieses mit seiner Eigenfrequenz weiter, die Amplitude der Wellenfronten nimmt mit der Zeit und dem Abstand vom Zentrum ab, einerseits durch die Dämpfung (Umwandlung von mechanischer Energie in andere Energieformen) und andererseits durch die nach außen stetig zunehmende Länge jeder Wellenfront, siehe Abbildung 4-100.

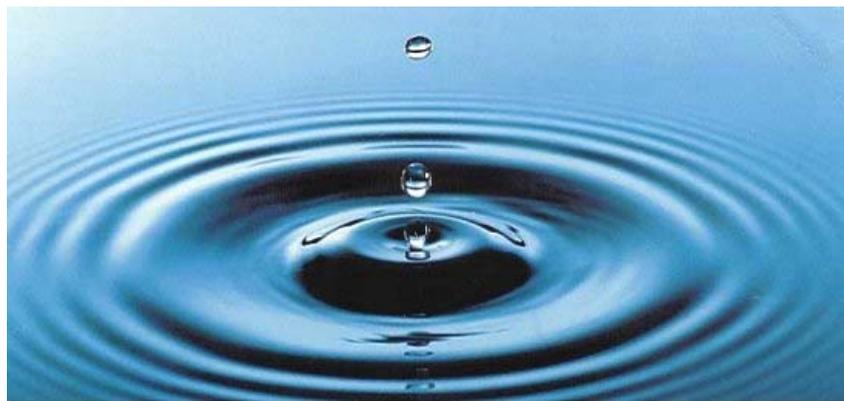


Abb. 4-100 Wellen auf einer Wasseroberfläche [Clem11]

Tatsächlich existiert eine von der Nadelkonfiguration, dem Nadelherausstand, der Lokalisation am Körper, dem Individuum und den sonstigen Umständen der Stechbehandlung abhängige individuelle Stechfrequenz, bei der die Ausbreitung der Oberflächenwellen im Stroboskoplicht zu stagnieren scheint. Und zwar genau dann, wenn die Eigenfrequenz der Haut mit der Stechfrequenz übereinstimmt.

Dem entgegen wird die unter dem Stroboskoplicht beobachtete Wellenlänge der sich ausbreitenden Oberflächenwellen ein Minimum annehmen, wenn die Stechfrequenz so gewählt wird, dass durch eine erste Stechbewegung eine Anregung zur Schwingung der Haut mit ihrer Eigenfrequenz und eine zweite Stechbewegung um 180° phasenversetzt erfolgt. Dies bedeutet, dass sich die Oberfläche der Haut im Bereich der Stechstelle der erneut stechenden Nadel entgegen bewegt. Dadurch addieren sich die einzelnen, entgegen gerichteten Geschwindigkeiten beider Stechpartner zu einer hohen Relativgeschwindigkeit, die das Eindringen der Nadel begünstigt.

Denkbar ist die Umsetzung dieses Konzepts durch ein einfaches, beispielsweise ringförmiges Handgerät, welches die eingeschlossene Hautauflagefläche unter flachem Winkel und von allen Seiten wiederholt blitzartig beleuchtet. Dabei lassen sich moderne Hochleistungs-LEDs einsetzen. Die Auslösung jedes einzelnen Blitzes erfolgt über die Erfassung der Bewegung der Nadel über geeignete Sensoren, beispielsweise mittels eines am Stechgerät angebrachten Sensors. Denkbar ist auch eine kabelgebundene Variante, die vom elektronischen Steuergerät des Stechgeräts versorgt und kontrolliert wird. Die Anwendung kann so erfolgen, dass zur Einstellung der optimalen Arbeitsfrequenz des Stechgeräts das ringförmige Handgerät im Behandlungsbereich aufgelegt und mit dem Stechgerät auf der eingeschlossenen Hautfläche testweise gearbeitet wird. Anhand der beobachteten Wellenausbreitung wird die Frequenz durch Anpassung der Einstellungen am Steuergerät des Stechgeräts optimiert. Eine Möglichkeit ist, statt des zusätzlichen Handgeräts eine LED in das Gehäuse des Stechgeräts zu integrieren. Dadurch werden eine unbequeme Arbeitsweise und möglicherweise störende Wellenreflexionen verhindert. Bei der Gehäusegestaltung soll möglichst ein zur Hautoberfläche tangentialer Lichteinfall realisiert werden, um die Darstellung des Höhenprofils der bei der Stechbehandlung entstehenden Wellen zu verbessern. Die Abgabe der entstehenden Verlustwärme beim kurzzeitigen und impulsartigen Betrieb der LED (einmalig vor der Behandlung) kann beispielsweise über das Gehäuse des Stechgeräts erfolgen.

Praktische Versuche müssen zeigen, welche Forderung an ein optimiertes Ergebnis gestellt werden muss, eine stehend erscheinende Welle, eine minimale Wellenlänge oder andere.

Neben den genannten Vorschlägen gibt es auch die Möglichkeit, die Anregung der Oberflächenwellen durch einen zusätzlichen Aktor vorzunehmen, beispielsweise einen elektrodynamischen Schwingantrieb [Demj12]. Denkbar ist, dass dieses Gerät mit einem Hautkontakt versehen wird und anzeigt, bei welcher Frequenz der Hautkontakt verloren geht. Zudem lassen sich aus dem Verlauf der vom Gerät erzeugten Kraft des Messstößels und der resultierenden Amplitude der Hautschwingung bis zum Kontaktverlust Rückschlüsse auf die Eigenfrequenz und die Parameter der Haut ziehen.

Beim Konzept des Ringmoduls wird die in der Abbildung 4-100 dargestellte und zuvor beschriebene Wellenausbreitung bei impulsförmiger Anregung teilweise umgekehrt. Im Betrieb des Ringmoduls trifft der Ring bei jeder Stechbewegung auf die unvorgespannte Hautoberfläche und bewirkt dadurch eine ringförmige Wellenanregung, die sich beidseits des Rings ausbreitet und dabei einer Dämpfung durch innere Gewebereibung unterliegt. Bei der zentripetal laufenden Welle tritt eine Amplitudenerhöhung auf, sofern die Dämpfung nicht überwiegt.

Damit ergibt sich in der Ringmitte eine deutliche Wölbung der Haut, sodass diese sich dabei automatisch spannt, gegen die fest stehende Nadel schlägt und von ihr penetriert wird. Damit grenzt sich dieses Verfahren vom Stand der Technik ab, insbesondere in Bezug auf die erreichte Größenordnung der Amplitude und der Arbeitsfrequenz.

Für die Versuche wurde ein Ringmodul aufgebaut, siehe Abbildung 4-101, und mit einem Tätowiergerät Cheyenne Hawk an der unvorgespannten Haut des Unterarms getestet. Dafür wurde an einem quer eingelöteten Klemmbalken eine Kanüle Durchmesser 0,3 mm derart angebracht, dass selbst bei manuell aufgebrachtem, statisch-kräftigem Druck die sich wölbende Haut von der Nadelspitze nicht punktiert wird, wie die Abbildung 4-102 und insbesondere der vergrößerte Ausschnitt verdeutlichen. Mit diesem Versuchsmuster lassen sich relative Stechgeschwindigkeiten zwischen Nadel und Haut von etwa 2,5 m / s erreichen. Zum Vergleich: die Maximalgeschwindigkeit der Stechbewegung beim eingesetzten Stechaktor und der verwendeten Arbeitsfrequenz von etwa 90 Hz lag bei etwa 1,0 m / s.



Abb. 4-101 Durch Modifikation eines Tätowiermoduls aufgebautes Ringmodul mit festem Durchmesser und fest angebrachter Nadel

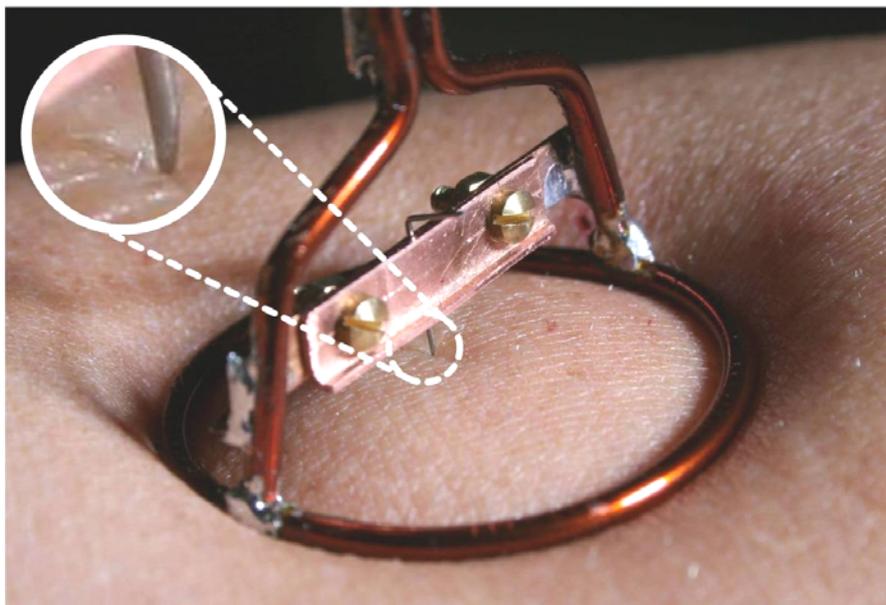


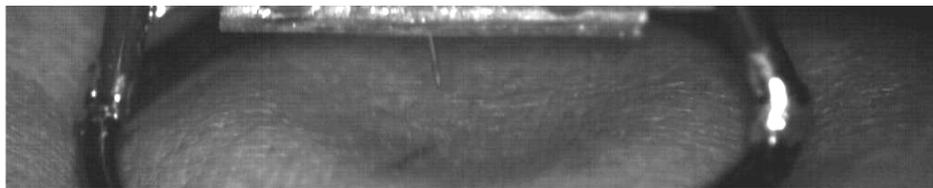
Abb. 4-102 Durch tiefes Eindringen des Ringmoduls wird aufgrund der hoch aufgehängten Nadel keine Hautpunktion erhalten, Bildausschnitt mit fünffacher Vergrößerung

Die Highspeed-Videoaufnahmen, mit denen die Versuche dokumentiert wurden, zeigen eine gute Übereinstimmung mit der eingangs beschriebenen Idee des Konzepts, siehe Abbildung 4-103. Gezeigt ist eine Sequenz von Standbildern, beginnend kurz nach dem initialen Ringkontakt mit beginnender Ausbreitung der Zentripetalwelle bis zum beginnenden Zurückweichen der Haut und dem Gleiten der Nadel aus der Haut.

Ein besonderer Vorteil bei diesem Konzept ist, dass die Nadel sicher verborgen innerhalb des Ringmoduls liegt, was den Sicherheits- und Risikoaspekten im Bereich der Medizintechnik gerecht wird.



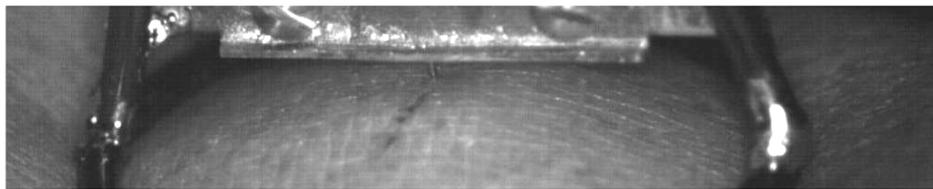
07.10.2010 15:04:42 11424 2927,5[ms] 640x131, 3902 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



07.10.2010 15:04:42 11432 2929,6[ms] 640x131, 3902 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



07.10.2010 15:04:42 11435 2930,3[ms] 640x131, 3902 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



07.10.2010 15:04:42 11440 2931,6[ms] 640x131, 3902 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33



07.10.2010 15:04:42 11452 2934,7[ms] 640x131, 3902 Hz, SpeedCam MiniVis #00652, V1.7.33

Abb. 4-103 Einzelbilder eines Highspeed-Videos zeigen die Verhältnisse beim senkrechten Stechen einer Kanüle mit Ringmodul mittels Standard-Tätowiergerät in unvorspannte Haut

Für weiterführende Versuche wurde ein stabiles Ringmodul aufgebaut, das über Wechselvorsätze verfügt, die im Bereich von 10 mm bis 30 mm einen variablen Ringdurchmesser mit einer Staffelung von 5 mm ermöglichen, siehe Abbildung 4-104. Für die auch im Gesichtsbereich durchgeführten Untersuchung wurde zudem auf das Anbringen einer Nadel verzichtet, da das für einen erfolgreichen Stechvorgang essentielle Hautwölben auch ohne Stechvorgang gut in den Highspeed-Videos zu beobachten und zu bewerten ist.



Abb. 4-104 Durch Modifikation eines Tätowiermoduls aufgebautes Ringmodul mit auswechselbaren Ringvorsätzen unterschiedlichen Durchmessers

Bei den Versuchen wurde die Haut im Bereich des Oberlippengrübchens (Philtrum), des Mundwinkels, des Kieferwinkels (auf dem entspannten Kaumuskel, *Musculus masseter*), der Nasenwurzel (Glabella) und der Mitte des Brauenbogens mit einer festen Arbeitsfrequenz von 100 Hz angeregt. Dabei wurden verschiedene Durchmesser des Ringmoduls getestet.

Bei den Versuchen konnten keine geschlechterspezifischen Unterschiede beobachtet werden. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass dieses Konzept für eine Behandlung im Bereich stark sensibel innervierter Haut bedingt geeignet ist, da die starken Vibrationen der Haut einige Zeit über die Behandlungsdauer hinaus fortbestehende Fehlempfindungen (Kribbeln, Taubheit), eine so genannte Parästhesie, bewirken. Andererseits kann die beschriebene Sensibilitätsstörung vorteilhaft bei einer Behandlung mit einer Nadel im Ringmodul sein, wenn dadurch eine verringerte oder aufgehobene Schmerzempfindung erzielbar ist. Denkbar ist auch eine entsprechende betäubende Vorbehandlung der Haut ohne eine Nadel, sodass die anschließende eigentliche Behandlung mit einem herkömmlichen Stechgerät schmerzreduziert erfolgen kann.

Zusätzlich stellen beispielsweise die Kinn-, Jochbein- oder Stirnpartie Bereiche mit schwierigem Untergrund dar. In diesen Bereichen muss mit einem eher kleinen Durchmesser gearbei-

tet werden, um den Effekt der Hautwölbung in der Ringmitte beobachten zu können. Dabei findet lediglich eine geringe Amplitudenüberhöhung statt. Eine Erklärung ist, dass durch das wenig ausgeprägte Unterhautfettgewebe und die bindegewebige Befestigung auf dem Untergrund ein großer Teil der über den Ringaufprall eingetragenen mechanischen Energie umgewandelt wird und die Hautschwingung bereits in unmittelbarer Nähe zum Ring abklingt. Des Weiteren ist die Abnahme der Wellenfrontlänge (Umfang) begrenzt, da bereits mit kleinem Umfang angeregt wird.

Bei einem konstruktiv überarbeiteten Ringmodul lässt sich die Nadel mit einer Schwungmasse gekoppelt und axial federnd geführt derart mittig aufhängen, dass sie in ihrer Ruhelage an einem mitbewegten Anschlag im Ringmodulstößel ruht und sich beim Stechvorgang der Haut und nach dem Aufprall des Rings auf die Hautoberfläche als träge Masse weiter- und der sich wölbenden Hautfläche entgegenbewegt. Dadurch lässt sich die Relativgeschwindigkeit zwischen der Nadel und der Haut während der Stechbewegung im Vergleich zum bisher aufgebauten Ringmodul weiter erhöhen. Vorteilhaft sind dabei eine einstellbare Federvorspannung und die Kombination mit der Stechtiefenbegrenzung, wodurch sich das Modul an die gewünschte Stechtiefe und den veränderlichen Hautuntergrund anpassen lässt.

Denkbar ist bei der Behandlung von Hautbereichen mit geringer Dämpfung und die Ringanregung zugunsten einer Zweipunktanregung in Gabelform aufzugeben. Ein solcher Aufbau spart einerseits Verpackungsvolumen und macht andererseits Behandlungen an schwer zugänglichen Stellen möglich.

5 Bewertung der Konzepte

Für eine vergleichende Beurteilung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Varianten zum Eintragen von Substanzen in die Haut bei multiplen Punktionen und vermindertem Hautausweichen wurde das Verfahren der Nutzwertanalyse angewendet. Dazu wurde das in [Mü-He07] beschriebene Vorgehen modifiziert, um die Aussagekraft zu verbessern und eine ungewollte Polarisierung bei der vergleichenden Bewertung zu vermeiden. Das Gesamtziel ist die Suche nach einem „möglichst guten Konzept“. Dazu wurden allgemeingültige Hauptziele gesucht, die die wesentlichen Anforderungen zum Erreichen des Gesamtziels „gutes Konzept“ beschreiben. Bei der Formulierung der Hauptziele wurde eine Situation aus der praktischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit während der Produktentwicklung angenommen, bei der zur Lösung eines gegebenen Problems innerhalb der sondierenden Machbarkeitsphase beispielsweise eine Anzahl von Entwürfen und Konzepten erarbeitet wurde, aus denen für die weitere Spezifikationsphase das am besten Geeignete zu wählen ist. Daher wurden bei der Bewertung nicht, wie bei der Nutzwertanalyse üblich, nur Aspekte eines bereits einsatzbereiten Produkts, sondern auch solche der Produktentwicklung berücksichtigt.

Identifikation der Ziele und Kriterien

Als Hauptziele für ein möglichst gutes Konzept wurden eine gute Handhabbarkeit (Haptik, Ergonomie usw.), ein geringes über die Anwendung hinausgehendes zusätzliches Gefahrenpotenzial, eine gute Wirksamkeit des Verfahrens oder der Methode sowie eine gute Umsetzbarkeit in ein Produkt identifiziert. In der Praxis orientiert man sich bei der Auswahl des bestgeeigneten Konzepts vorrangig am letztgenannten Hauptziel, weil dieses für ein Unternehmen eine große wirtschaftliche Bedeutung hat. Eine systematische, allseitige und umfassende Bewertung wird dabei seltener vorgenommen, üblich sind so genannte Bauchentscheidungen bei der Bewertung der drei erstgenannten Hauptziele. Betrachtet man den für eine detaillierte Systematik notwendigen Zeit- und Personalaufwand, und sind die Entwürfe wenig unterschiedlich und beruhen auf einer etablierten Methode, stellt dieses Vorgehen eine bewährte Vereinfachung mit guter Näherung dar. Sind die Entwürfe dagegen komplex, neuheitlich und / oder gänzlich unterschiedlich, ist ein umfassendes und tief greifendes, systematisches Vorgehen hilfreich. Zudem lassen sich die vorgenommenen Bewertungen und Annahmen wie hier dokumentieren und gegebenenfalls später nachvollziehen oder geeignet revidieren. Letzteres kann notwendig sein, wenn sich primär-basale und vereinfachende Annahmen durch unvorhergesehene Entwicklungen am Markt oder durch den Wettbewerb ändern. Zudem erkennt man anhand der durch das unten beschriebene Vorgehen ermittelten Wichtungsfaktoren für die vier Hauptziele (vgl. Abbildung 5-1) die vergleichsweise untergeordnete Bedeutung des Hauptziels „Umsetzbarkeit als Produkt“, was ein verstärkt-systematisches Vorgehen gegenüber subjektiven Entscheidungen motiviert.

Die Hauptziele wurden in Zielbereiche unterteilt, für die wiederum jeweils detaillierte Kriterien formuliert wurden. Die einzelnen Verzweigungen der so erhaltenen dreistufigen Baumstruktur wurden mit einer Kennzahl identifiziert, sodass die familiäre Zugehörigkeit der Kriterien nachvollziehbar ist. Dadurch bleibt die nachfolgend beschriebene Ermittlung der Wich-

tungsfaktoren für die Kriterien transparent und eindeutig zuordenbar. Die Kennzeichnung der Kriterien erfolgt als zweistellige Vorkommazahl mit einer Nachkommastelle. Die Zehnersteller identifiziert das übergeordnete Hauptziel, die Einerstelle den übergeordneten Zielbereich. Im Unterschied dazu identifiziert die Nachkommastelle das aktuelle Kriterium.

In jeder Spalte der Struktur wurde den Ästen einer Verzweigung entsprechend deren Bedeutung ein Wichtungsfaktor zugeordnet, wobei die Gewichte so verteilt sind, dass die Gesamtsumme jeweils zehn ergibt. Dabei wurden die Gewichte auf eine Nachkommastelle gerundet. Zur Ermittlung der Wichtungsfaktoren wurden für jede Verzweigung so genannte gewichtete Paarvergleichsmatrizen aufgestellt, mit deren Hilfe alle einer Verzweigung untergeordneten Ziele oder Kriterien systematisch miteinander verglichen und dabei die Bevorzugungen jedes Partners gegenüber dem Anderen als Punktwert gespeichert werden. Beim Standardvorgehen nach [MüHe07] wird eine Matrix durch einen Spaltenvektor und dessen transponierten Zeilenvektor aufgespannt, wobei im Spalten- bzw. Zeilen-Vektor die zu vergleichenden Partner angeordnet sind und stattdessen durch Buchstaben oder Zahlenschlüssel gekennzeichnet sein können. Ähnlich dem Vorgehen bei der Bildung des Vektorprodukts Spaltenvektor \cdot Zeilenvektor werden die Einträge der Matrix derart erzeugt, dass die sonst miteinander zu multiplizierenden Vektorelemente jeweils miteinander verglichen und die Ergebnisse des Vergleichs in das korrespondierende Matrixelement geschrieben werden. Sofern das Element des Spaltenvektors zu bevorzugen ist, wird eine Eins, andernfalls eine Null eingetragen. Für die Elemente der Hauptdiagonale wird der Wert Null eingetragen. Man erkennt, dass die vollständige Information bereits in einer der beiden Dreiecksmatrizen enthalten ist, die andere ist entsprechend komplementär zu bilden.

Die an diesem Vorgehen vorgenommene Modifikation besteht darin, dass nicht nur entweder Null oder Eins, sondern Werte zwischen Null und Zehn vergeben werden können, wobei jeweils ein Schieberegler mit den beiden zu vergleichenden Partnern als Endpunkte verwendet wurde, um den Grad der Bevorzugung mit einer möglichst hohen Skalenqualität zu erfassen. Für eine hinreichende Genauigkeit wurde eine Auflösung von $1 / 10^5$ verwendet. Der Wert Zehn entspricht dabei einer Bevorzugung des Spaltenvektorelements, Null einer Bevorzugung des Zeilenvektorelements. Hierbei ist insbesondere auch die Gleichheit beider durch den Wert Fünf möglich. Die Schieberegler wurden so eingerichtet, dass sich der Grad der Bevorzugung durch die Verlagerung des Schiebers mehr oder weniger zur bevorzugten Seite hin einstellen lässt. Dass die Elemente der Hauptdiagonale den Wert Null erhalten müssen, lässt sich anhand der Matrizen für den Paarvergleich bei lediglich zwei Alternativen zeigen: bei absoluter Bevorzugung oder Ablehnung (10 oder 0) eines Partners wird deutlich, dass wenn die Hauptdiagonale mit dem mittleren Wert für die Gleichheit (= 5) besetzt wird, der Ausgabewert verfälscht und ein maximales bzw. minimales Gewicht von 75 % bzw. 25 % statt 100 % bzw. 0 % ausgegeben wird. Die Matrizen und die Schieberegler wurden in Excel® programmiert.

Die Abbildung 5-1 zeigt eine Übersicht auf die Struktur, die Nummerierung der Verzweigungen und die ermittelten Wichtungsfaktoren der einzelnen Zweige.

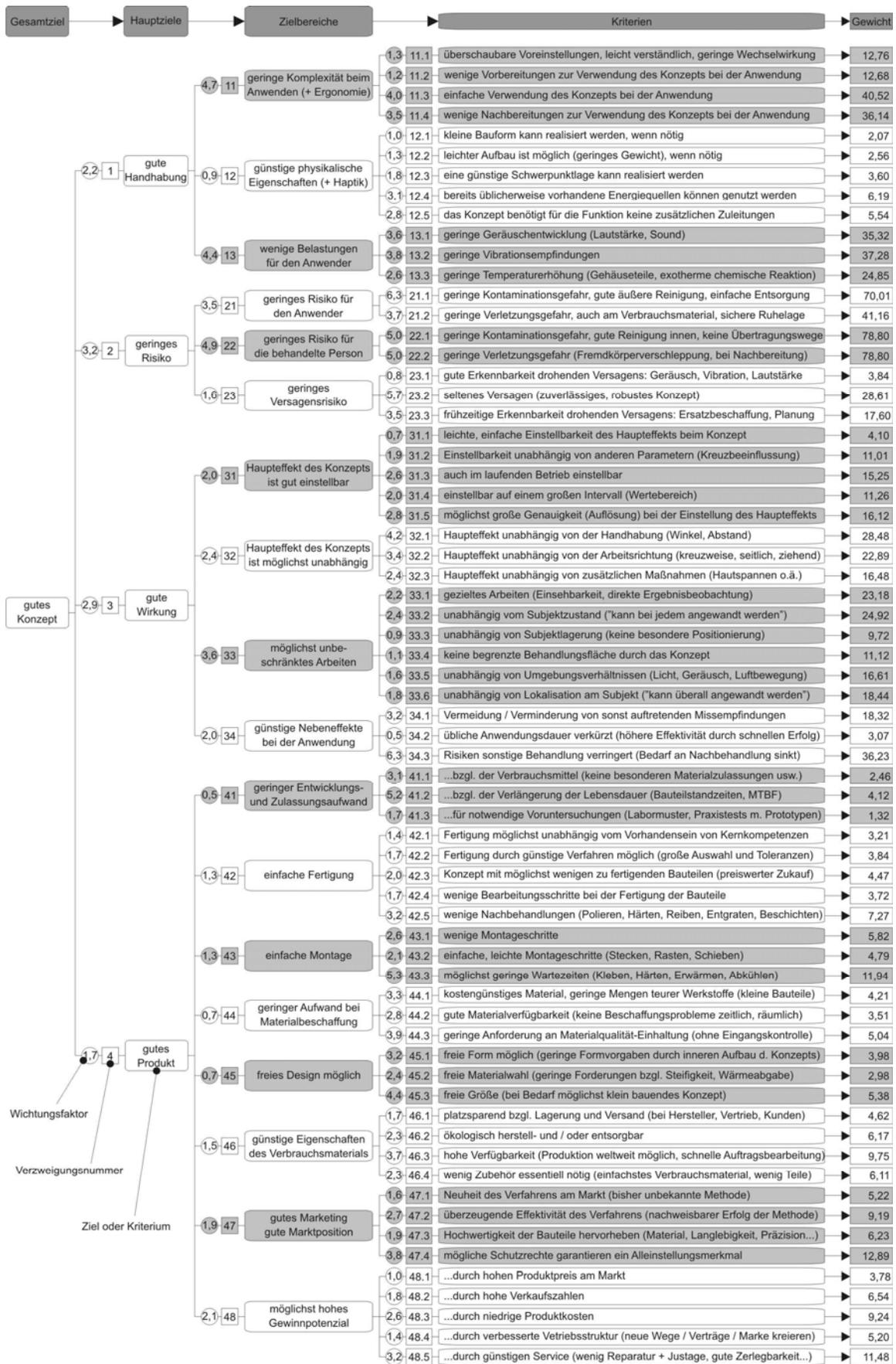


Abb. 5-1 Struktur für die Bewertung der Konzepte (Gesamtziel, Hauptziele, Zielbereiche und Kriterien), modifiziert nach [MüHe07]

Eine dreigeteilte Tabelle mit der Verzweigungsstruktur für die Ziele und Kriterien (detaillierter Klartext, ohne Wichtungsfaktoren) sowie sämtliche Paarvergleichsmatrizen zur Ermittlung der Wichtungsfaktoren findet man im Anhang, vgl. Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-3 sowie die Abbildungen 8-11 bis 8-33.

Die mittels des gewichteten Paarvergleichs gewonnenen Wichtungsfaktoren wurden für jeden Verzweigungspfad - vom Gesamtziel zum Kriterium - miteinander multipliziert (je 3 Faktoren), sodass sich für jedes Kriterium ein (Teil-) Gewicht ergibt. Die Summe aller Gewichte ergibt 1.000 (= 10^3).

Durch das bisher beschriebene Vorgehen wurden Gewichte für die Kriterien erhalten, die deren anteilige Bedeutung am Gesamtziel „gutes Konzept“ widerspiegeln. Anhand der Gewichte lassen sich besonders wichtige oder wesentliche Kriterien ohne Betrachtung der übergeordneten Strukturen identifizieren.

Das Bewertungsverfahren

Für die eigentliche Bewertung der Konzepte wurden in einer weiteren Tabelle die Kriterien 11.1 bis 48.5 gemeinsam mit den jeweiligen Gewichten den zu bewertenden Konzepten gegenübergestellt. Dabei wurde jedem Entwurf eines Geräts, eines Verbrauchsmoduls oder eines Verfahrens ein individueller Schlüssel zugeordnet. Der Kennbuchstabe A wurde dafür vom Begriff „Alternative“, gleichbedeutend mit „Alternativvorschlag zur Wahl des am besten geeigneten Konzepts“, abgeleitet:

A_01	Kurbeltrieb mit innen liegendem Lager (Innenlager)
A_02	Stabkurbeltrieb
A_03	QKT - Prototyp
A_04	QKT - Redesign
A_05	Sprungaktor
A_06	Schlagaktor
A_07	Versteifungsschicht
A_08	Stechtiefenbegrenzung
A_09	Kammstechverfahren
A_10	Vakuummodul
A_11	Ringmodul
A_12	Gleit-Reib-Modul
A_13	LED-Stroboskop als Zusatzgerät
A_14	LED-Stroboskop, in das Stechgerät integriert

Des Weiteren wurde eine Notenskala erstellt. Für ein hohes Skalenniveau spannt die Skala den Bereich von „sehr schlecht“ bzw. „intolerabel“ (= Note 0) bis „sehr gut“ bzw. „optimal“ (= Note 6) mit einer regelmäßigen Teilung auf, siehe Abbildung 5-2. Eine Note weist für eine genaue Differenzierung unendlich viele Nachkommastellen auf, bei der Bewertung wurde auf eine Nachkommastelle gerundet. Zur Notenvergabe wurden zuerst nacheinander alle Alternativen bezüglich des ersten Kriteriums 11.1 beurteilt. Dabei wurde jeweils der Grad der Ausprägung oder der Realisierbarkeit des Kriteriums beim Konzept mit einer entsprechenden

Note aus dem Intervall [0, 6] bewertet und gegebenenfalls iterativ angepasst. Anschließend wurde dies für alle weiteren Kriterien (11.2 bis 48.5) wiederholt.

Das Kriterium trifft sehr schlecht (intolerabel) zu =	Note 0
Das Kriterium trifft schlecht zu =	Note 1
Das Kriterium trifft eher schlecht zu =	Note 2
Das Kriterium trifft weder schlecht noch gut zu =	Note 3
Das Kriterium trifft eher gut zu =	Note 4
Das Kriterium trifft gut zu =	Note 5
Das Kriterium trifft sehr gut (optimal) zu =	Note 6

Abb. 5-2 Skala für die Benotung der Konzepte hinsichtlich der Kriterien 11.1 bis 48.5

Die erhaltenen Noten für jede Alternative wurden mit dem Gewicht des aktuell betrachteten Kriteriums multipliziert und so ein Nutzwert erhalten, der den Beitrag der Kriteriumsausprägung am Gesamtnutzen dieser Alternative darstellt. Der Gesamtwert (= Gesamt-Nutzwert) eines Konzepts oder Alternative ergibt sich als die Summe aller (Teil-)Nutzwerte.

Die detaillierte Bewertungstabelle mit Benotung und daraus resultierenden (Teil-)Nutzwerten findet man im Anhang. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde sie dreigeteilt wiedergegeben (vgl. Tabelle 8-4 bis Tabelle 8-6).

Ergebnisse der Bewertung

Die Ergebnisse der Bewertung wurden in zwei Übersichtstabellen zusammengefasst. In der Tabelle 5-1 werden die Hauptziel-Teilnutzwerte sowie die Gesamtnutzwerte für alle Konzepte als Absolutwerte dargestellt. Die Tabelle 5-2 gibt die Ergebnisse relativ zum Maximum der jeweiligen Spalte wieder.

	Übersicht (absolut):	HZ "Handhabung"	HZ "Sicherheit"	HZ "Wirkung"	HZ "Produktpotenzial"	Gesamt
Kurbeltrieb mit Innenlager	A_01	1.231,4	1.855,2	1.259,2	854,3	5.276,8
Stabkurbeltrieb	A_02	1.215,7	1.810,8	1.354,4	848,6	5.295,2
QKT - Prototyp	A_03	1.020,3	1.247,8	1.433,6	675,7	4.435,8
QKT - Redesign	A_04	1.074,2	1.427,1	1.434,2	723,8	4.717,8
Sprungaktor	A_05	1.036,2	1.203,6	1.534,9	777,2	4.626,4
Schlagaktor	A_06	1.035,2	1.514,1	1.212,9	634,2	4.444,2
Versteifungsschicht	A_07	998,6	1.264,5	1.198,1	889,5	4.418,3
Stechtiefenbegrenzung	A_08	1.228,4	1.848,5	1.607,9	893,6	5.646,6
Kammstechverfahren	A_09	1.232,4	1.848,5	1.401,0	821,3	5.364,2
Vakuummodul	A_10	913,2	1.209,0	1.048,5	664,0	3.887,7
Ringmodul	A_11	901,8	1.693,7	1.051,5	809,8	4.533,5
Gleit-Reib-Modul	A_12	1.296,9	1.666,9	680,5	683,4	4.370,4
LED-Stroboskop als Zusatzgerät	A_13	1.008,4	1.370,6	1.257,8	882,3	4.571,1
LED-Stroboskop, in Stechgerät integriert	A_14	1.115,9	1.809,2	1.293,0	899,2	5.169,4

Tabelle 5-1 Zusammenstellung der Ergebnisse der Bewertung (absolut, HZ = Hauptziel)

	Übersicht (relativ):	HZ "Handhabung"	HZ "Sicherheit"	HZ "Wirkung"	HZ "Produktpotenzial"	Gesamt
Kurbeltrieb mit Innenlager	A_01	0,949484284	1	0,78316269	0,950128435	0,934510339
Stabkurbeltrieb	A_02	0,937399927	0,976052876	0,84236446	0,94376694	0,937776717
QKT - Prototyp	A_03	0,786669724	0,672581079	0,89157025	0,751504385	0,785580421
QKT - Redesign	A_04	0,828290029	0,769259126	0,89195515	0,804949124	0,835524019
Sprungaktor	A_05	0,798939808	0,648800877	0,95460464	0,864392617	0,819338828
Schlagaktor	A_06	0,798191283	0,816157321	0,75430625	0,705370806	0,787063933
Versteifungsschicht	A_07	0,76998258	0,681626823	0,74514513	0,989256168	0,782480584
Stechtiefenbegrenzung	A_08	0,947135906	0,996411738	1	0,993834343	1
Kammstechverfahren	A_09	0,9502345	0,996411738	0,87134643	0,913407167	0,94999843
Vakuummodul	A_10	0,704141798	0,651668599	0,65211358	0,738431739	0,688500538
Ringmodul	A_11	0,695370558	0,912949412	0,65396755	0,900621945	0,802870648
Gleit-Reib-Modul	A_12	1	0,898485678	0,42325196	0,760019072	0,774002266
LED-Stroboskop als Zusatzgerät	A_13	0,777494663	0,7387825	0,78223963	0,981205176	0,809537279
LED-Stroboskop, in Stechgerät integriert	A_14	0,860399607	0,975201958	0,80415539	1	0,915489077

Tabelle 5-2 Zusammenstellung der Ergebnisse der Bewertung (relativ, HZ = Hauptziel)

Anhand der Abbildung 5-3 erkennt man für die Konzepte Stechtiefenbegrenzung (A_08), Kammstechverfahren (A_09), Kurbeltrieb mit Innenlagerung (A_01), Stabkurbeltrieb (A_02) und integriertes LED-Stroboskop (A_14) ein ähnlich gutes Abschneiden bei der Gesamtbewertung mit leicht abnehmender Tendenz.

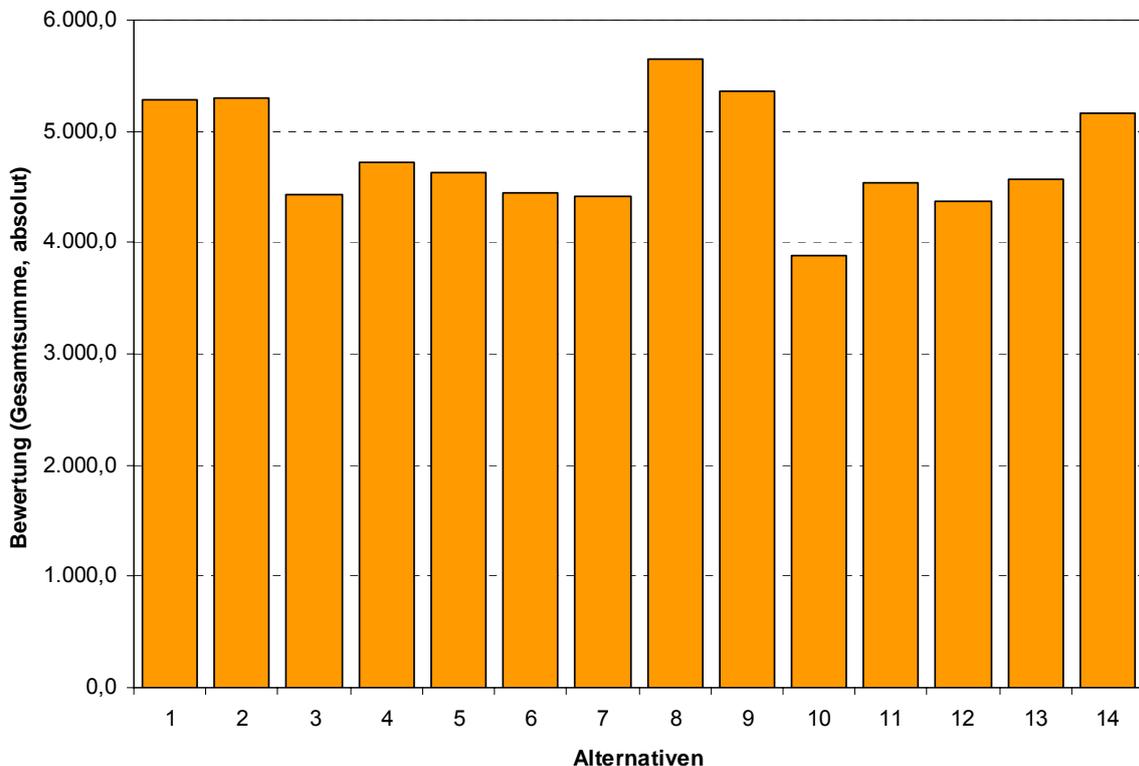


Abb. 5-3 Ergebnis der Gesamtbewertung der entwickelten Konzepte, Verbrauchsmodule und Verfahren (absolut)

Anhand der Relativdarstellung in der Abbildung 5-4 erkennt man zudem eine Ebenendriteilung der Bewertungsergebnisse: fünf Konzepte erreichen einen Gesamtwert von über 90 %, acht Konzepte liegen nahe 80 % und ein Konzept erhält weniger als 70 % der Maximalbewertung. Das Konzept Stechtiefenbegrenzung (A_08) liegt dabei mit deutlichem Vorsprung an erster Stelle, die schlechteste Gesamtbewertung erhielt das Konzept Vakuummodul (A_10).

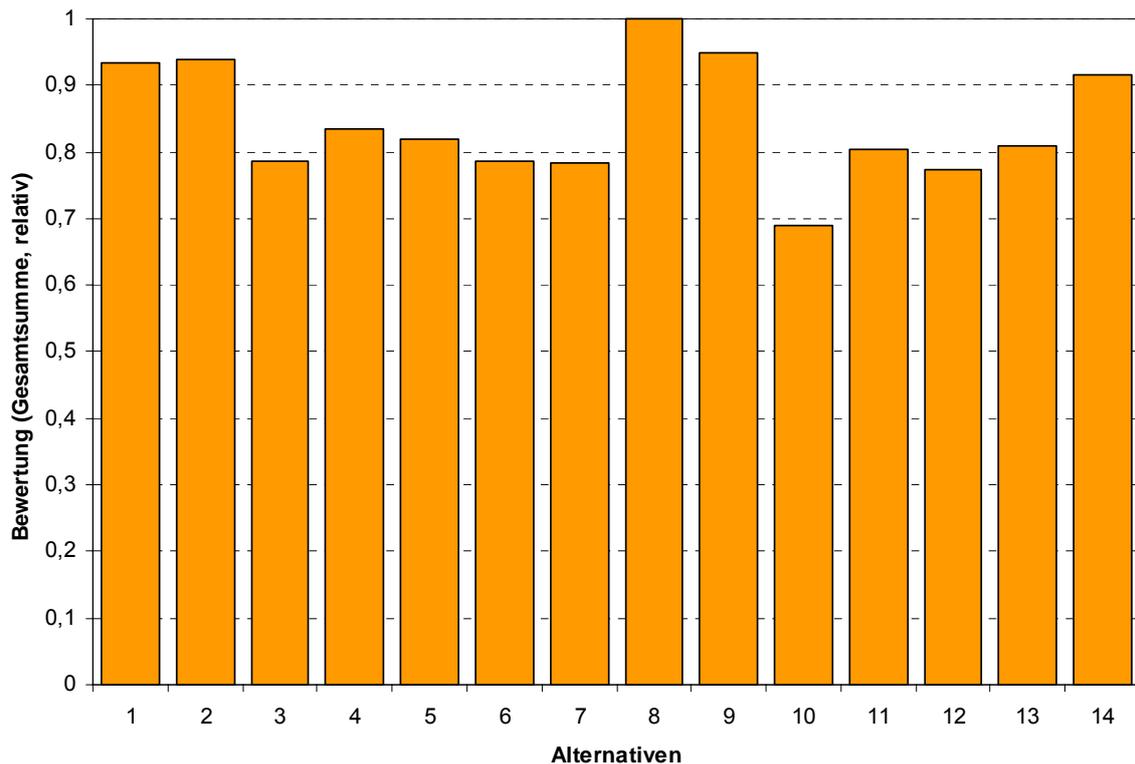


Abb. 5-4 Ergebnis der Gesamtbewertung der entwickelten Konzepte, Verbrauchsmodule und Verfahren (relativ)

Die Betrachtung des Gesamtwerts der Konzepte für sich allein genommen lässt nur eine begrenzte Aussage zu. Beispielsweise ist eine durchgängig hochrangige Bewertung gegenüber einer Ausreißer-behafteten, unregelmäßigen vorzuziehen. Dies erkennt man an detaillierten Darstellungen der Zwischenergebnisse. Dabei muss man beachten, dass durch die Zusammenfassung von Werten zu Zwischensummen (Gruppenbildung) bereits eine Glättung von Werteschwankungen auftritt, die extremale Ausreißerwerte maskiert.

Die Abbildungen 5-5 und 5-6 zeigen für die Konzepte die Zwischensummen, bzw. Nutzwertbeiträge bezüglich der einzelnen Hauptziele, sowohl in absoluter als auch in relativer Darstellung. Anhand der relativen Darstellung lassen sich die Konzepte leichter miteinander vergleichen und beurteilen. Die absolute Darstellung vermittelt vorrangig einen Eindruck des absoluten Nutzenbeitrags zum Gesamtnutzen. Hierin spiegelt sich das über den geringeren Nutzenbeitrag des vierten Hauptziels „Produktpotenzial“ Gesagte wieder. Die Nutzwertbeiträge liegen hier teils deutlich hinter denen der anderen Hauptziel-Kriterien. Höchste Beiträge leistet das Hauptziel „Sicherheit“ vor dem Hauptziel „Wirkung“.

Wichtig bei der Betrachtung der Relativedarstellung ist, dass die Ergebnisse aller Konzepte nur innerhalb eines Hauptziels verglichen und beurteilt werden. Andernfalls werden unzulässig verzerrte Schlussfolgerungen abgeleitet, beispielsweise dass beim Konzept der Stechtiefenbegrenzung (Nr. 8) die Nutzwertbeiträge anteilig gleich hoch ausfallen, was für die tatsächlichen Nutzwertbeiträge nicht zutreffend ist.

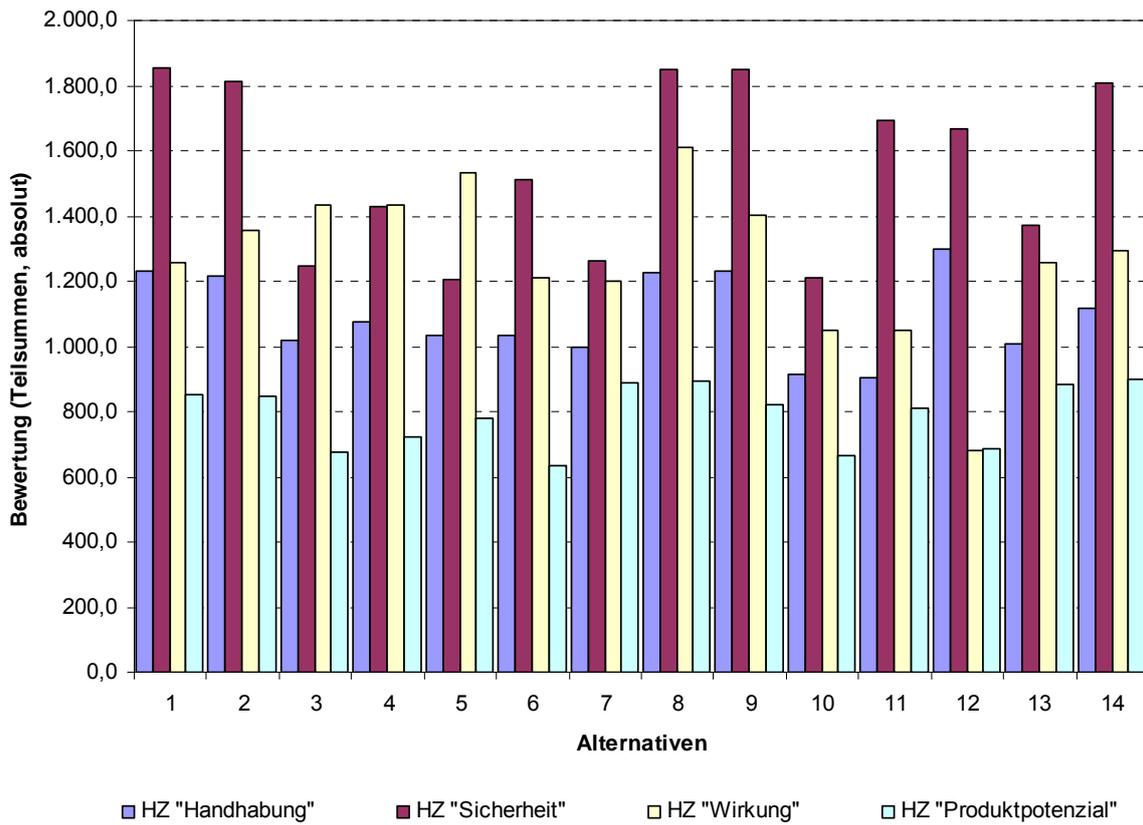


Abb. 5-5 Grafische Darstellung der Ergebnisse der Bewertung in den Hauptzielen (absolut)

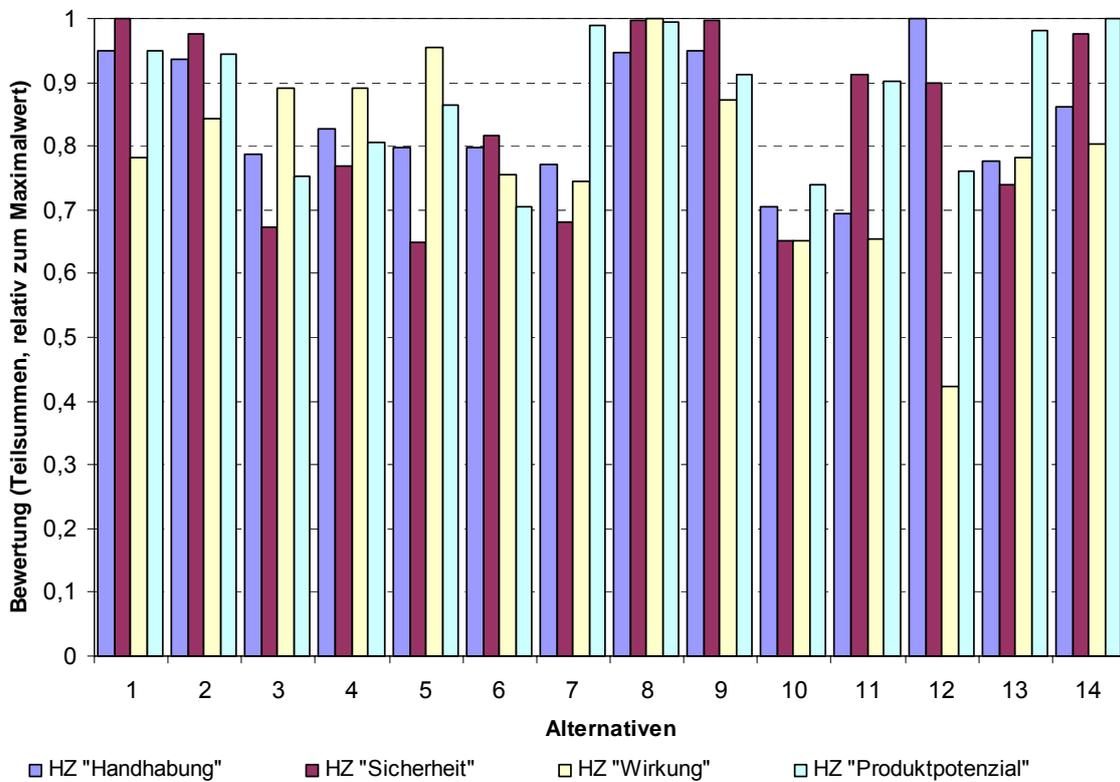


Abb. 5-6 Grafische Darstellung der Bewertung bezüglich der Hauptziele (relativ, bezogen auf das Hauptziel-Maximum)

Anhand der Relativdarstellung lässt sich schließen, dass die Alternativen „Stechtiefenbegrenzung“ (A_08), „Kammstechen“ (A_09) sowie „Stabkurbeltrieb“ (A_02), „Querkurbeltrieb-Redesign“ (A_04) und „Vakuummodul“ (A_10) für alle Hauptziele annähernd gleiche Relativanteile erzielen.

Aus allen Ergebnissen und Betrachtungen lassen sich Präferenzen für die zu bewertenden Konzepte angeben. Wegen der insgesamt sehr guten Gesamtbewertung und des hochrangigen Abschneidens bei der Relativbetrachtung wird das Konzept „Stechtiefenbegrenzung“ (A_08) favorisiert. Das „Kammstechverfahren“ (A_09) erreicht ähnlich gute absolute und gleichzeitig konsistent-relative Werte. Dahinter rangieren etwa gleichauf die Konzepte „Stabkurbeltrieb“ (A_01), „Kurbeltrieb mit Innenlagerung“ (A_02) und „integriertes LED-Stroboskop“ (A_14), die den beiden besser bewerteten Konzepten vor allem in einer weniger gut bewerteten Wirksamkeit nachstehen.

Diskussion der Bewertung

Ein allgemeingültiges Bewertungsergebnis kann aufgrund der fehlenden Gruppenabstimmung bei allen zu treffenden Entscheidungen (Wichtung, Benotung) nicht vorliegen. Die formulierten Hauptziele und die Kriterienstruktur wurde zwar durch eine abschließende sondierende Befragung von mehr als 15 unabhängigen Personen gestützt. Sowohl von technisch versierten Fachleute als auch allgemeinen Produkthanwendern. Die Ermittlung der Wichtungsfaktoren durch die Bestimmung des Grads der Bevorzugung und die Benotung der Konzepte bezüglich jedes Kriteriums wurden jedoch ohne gemeinschaftliche Beratung durchgeführt. Insofern ist das Ergebnis einer solchen systematischen Bewertung immer auch von der Präferenz und Erfahrung der bewertenden Gemeinschaft abhängig und muss als relativ betrachtet werden.

Zudem wird deutlich, dass die vorgenommene Bewertung trotz ihres großen Umfangs nur einen geringen Teil der möglichen Ergebnisse dieser Arbeit erfasst hat: unabhängig von der Rangfolge der Konzepte bezüglich der Bewertungsergebnisse lassen sich große Synergien durch die zwei- oder mehrelementige Kombination geeigneter Konzepte erzielen. Insbesondere lassen sich die Vorteile der Stechtiefenbegrenzung und/ oder des integrierten LED- Stroboskops und eines der entwickelten Stechaktoren miteinander vereinen. So werden völlig neue technische Lösungen erhalten, deren Nutzwert neu zu bewerten ist. Zusätzlich lassen sich Konzepte mit hohem Anspruch an die Bauteileigenschaften und -beschaffenheit weit weniger kritisch aufbauen, da sich bereits eine gering gesteigerte Wirkung einer Lösung gegenüber einem Vergleichsverfahren durch die zusätzlich unterstützende Wirkung eines weiteren kooperierenden Konzepts zu einer deutlich vorteilhaften Gesamtlösung superponieren lässt.

Auf die Durchführung einer erneuten systematischen Bewertung der Vielzahl an möglichen Konzeptkombinationen wurde wegen der zunehmenden Unschärfe bei der subjektiven Bewertung teils konstruktiv wenig optimierter technischer Lösungen verzichtet. Der notwendige Aufwand ist erst gerechtfertigt, wenn getestete Prototypen verschiedener Konzeptkombinationen sowie aussagekräftige Messergebnisse und Erfahrungen damit vorliegen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der modernen Medizin wird die Haut als größtes sowie leicht zugängliches und gleichzeitig wichtiges Organ im komplexen Zusammenspiel aller Organe des Körpers wahrgenommen und intensiver als je zuvor erforscht. Stoffwechselfvorgänge und Zellinteraktionen, die genauen Prozesse der Hautregeneration und der physikalischen oder biochemischen Regulationsmechanismen, die immunologische Rolle und viele weitere, bisher verborgene Geheimnisse werden gelüftet und lassen die Haut aus wissenschaftlicher Sicht ständig in neuem Licht erscheinen. Vom besseren Verständnis der Haut profitieren neben der Medizin vor allem die moderne Kosmetik und damit schließlich die Verbraucher. Viele kosmetische Behandlungen und Produkte werden auf ihre Wirksamkeit und Unbedenklichkeit hin wissenschaftlich untersucht und die Zertifikate namhafter Institutionen als Unterstützung des Marketings eingesetzt. Diese Entwicklung wird gleichzeitig durch eine entsprechende Medienpräsenz unterstützt. Dabei wird ein breites Publikum erreicht und informiert. Eine umfassende Hautpflege gehört bereits für viele zum Alltag. Eine unterstützende Hautbehandlung mit sicherem Erfolg ist ein probates Mittel, um das Hautbild positiv zu beeinflussen. Gut auszusehen ist ein wichtiges Bedürfnis des Menschen und stellt damit eine herausragende wirtschaftliche Triebfeder dar. Gutes Aussehen ist in weiten Grenzen machbar geworden.

Die Grenzen zwischen Medizin und Kosmetik verschwimmen im Bereich der Hautbehandlung zunehmend, sowohl bezüglich der Behandlungsmethode als auch bezüglich der applizierten Komponenten. So werden beispielsweise zur Herstellung naturidentischer Pigmentierungen für die Rekonstruktion nach Hauttransplantationen medizinische Pigmentiergeräte eingesetzt. Des Weiteren werden von der Firma InnoCore Technologies BV (Groningen, Niederlande) als SynBiosys® Monospheres bezeichnete, injizierbare und resorbierbare Transportvesikel entwickelt, die sich aus Grundbausteinen selbst organisieren und die Wirkstofflösung einschließen. Nach der Applikation erfolgen im Gewebe eine verzögerte Freisetzung des Vesikelinhalts und ein Abbau der Vesikelhülle [InCo12]. So lassen sich sowohl Medikament als auch Kosmetika intradermal applizieren. Die Firma Deliverics produziert ähnliche selbstorganisierende Transportvesikel, die zum Verpacken von Erbinformationsmolekülen vorgesehen sind und diese vielfach besser in die zu transfizierenden Zellen schleusen [Deli12]. Es ist denkbar, dass in der Zukunft die gewünschte Hautveränderung durch das flächige DNS- oder RNS-Impfen der Haut erzielt wird. Behandlungen zur Hyposensibilisierung bei Autoimmunerkrankungen könnten durch eine Hautbehandlung mit epidermaler Applikation erfolgen.

Ein wesentliches Kriterium aller Hautbehandlungen ist die Effektivität beim Einsatz der Wirkstoffe und der Behandlungsmethode sowie der Erfolg des Verfahrens. Viele der Verfahren basieren auf einer Hautpunktion, bei der eine Nadelanordnung vor- und zurückbewegt wird, um damit Substanzen in die Haut einzutragen. Werden der dekorativen Kosmetik dienende Tätowier- und Permanent-Make-Up-Behandlungen mit eingeschlossen, wird die Stechbewegung der Nadelanordnung meist wiederholt, in schneller Folge und über eine lange Zeit ausgeführt. Die Effektivität und der Erfolg hängen dabei wesentlich vom schichtgenauen Applizieren des Wirkstoffs in der Haut ab. Bei der Punktion der Haut weicht diese der vordringenden Nadelanordnung aus. Dadurch ist es schwer, die gewünschte Stechtiefe zu erreichen.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, Ansätze zur besseren oder vollständigen Beherrschung des Hautausweichens beim einzelnen und insbesondere beim vielfach wiederholten Punktieren zu identifizieren und darauf aufbauend neue Aktoren, Methoden und Verbrauchsmodule zu entwickeln, die sich mit geringem Aufwand in den gewohnten Behandlungsablauf integrieren lassen. Zunächst wurde der aktuelle Stand der Technik bezüglich Verfahren und Methoden zum Punktieren von Haut und zum Eintragen von Substanzen in die Haut recherchiert und die damit verbundenen Arbeits- und Behandlungsabläufe in der Praxis beobachtet und analysiert.

Bei einem ersten Lösungsansatz bestand das Ziel darin, das Hautausweichen zu minimieren und die Behandlung entsprechend zu optimieren. Es wurde eine Vielzahl von Parametern für das Hautausweichen identifiziert, aus der Geeignete hinsichtlich einer wirtschaftlichen und praktikablen Umsetzbarkeit ausgewählt wurden. Einen wesentlichen Parameter stellt die Stechgeschwindigkeit dar. Hierzu wurden Versuche am Hautmodell und an in-vivo-Haut durchgeführt, mit denen eine Mindesteinstechgeschwindigkeit gesucht wurde, ab der das Hautausweichen vernachlässigbar ist. Eine solche Geschwindigkeit konnte nicht gefunden werden. Der Zusammenhang zwischen steigender Stechgeschwindigkeit und verringertem Hautausweichen ließ sich jedoch gut nachweisen. Daher wurden Aktoren mit großem Hub und hoher Stechgeschwindigkeit entwickelt, verglichen mit den marktüblichen Geräten: Der Kurbeltrieb mit Innenlager kehrt den Kraftfluss des üblichen Kurbeltriebs um und ist insbesondere für Tätowiermaschinen mit großem Hub trotz kleinem Gehäusevolumen geeignet.

Derzeit wird bei der Firma MT.DERM untersucht, inwieweit sich eine aktuelle Tätowiermaschine mit diesem Konzept einfacher und mit weniger Montageschritten aufbauen lässt. Der Stabkurbeltrieb besteht aus einer rotierenden Antriebsscheibe mit Kugelpfanne, einem Doppel-Kugelpfanne-Pleuelstange und einem abtriebsseitigen Stößel mit Kugelpfanne. Besonders vorteilhaft an diesem Antrieb ist neben dem großen Hub die einfach zu realisierende Hubeinstellung. Für beide genannten Aktorkonzepte ist nach dem erfolgreichen Abschluss der praxisnahen Versuche eine Patentanmeldung geplant. Ebenso für das Querkurbeltrieb-Konzept, welches auf der Basis der Zwei-Pleuel-Kette mit einer Zwangsführung eine große Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten und damit eine sehr gut an die Bedürfnisse anzupassende Dynamik aufweist. Eine QKT-Variante wurde als produktnaher Prototyp aufgebaut, der wegen der guten Ergebnisse beim Praxistest bei MT.DERM weiter überarbeitet wird.

Des Weiteren wurden Federaktoren und verschiedene Möglichkeiten für deren Aufbau als Stechgerät vorgeschlagen. Als Beispiel wurde ein in dieser Arbeit als Sprungaktor bezeichnetes Stechgerät aufgebaut, mit dem es gelungen ist, die Stechgeschwindigkeit von der Stechfrequenz zu entkoppeln. Durch die hohe Stechgeschwindigkeit wird selbst unvorspannte Haut von einer geeigneten Nadel mühelos und ohne nennenswertes Hautausweichen punktiert. Dieser Aktor eignet sich sowohl für Einzelstechanwendungen als auch für Verfahren mit multiplen Punktierungen. Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt im konstruktiv programmierbaren Dosierintervall und der dabei unbewegten Nadel, was vor allem für die Applikation hochviskoser Wirkstofflösungen vorteilhaft ist.

Um die Wechselwirkung zwischen der vordringenden Nadel und der Haut zu verringern, wurden Konzepte für die Überlagerung der Stechbewegung mit axialen oder radialen mechanischen Schwingungen entwickelt. Der aufgebaute Schlagaktor ermöglicht dies mit hoher Frequenz und ohne zusätzlichen Antrieb. Anhand der durchgeführten Versuche mit diesem Aktor ließ sich der gewünschte Effekt nicht nachweisen. Hierfür sind weitere Versuche und hoch auflösende objektive Messmethoden notwendig.

Die Verringerung der Hautelastizität stellte einen weiteren Ansatzpunkt dar, der auf verschiedene Wege umgesetzt wurde. Ein erster Vorschlag sah vor, dass durch eine aufzubringende oder zu erzeugende Versteifungsschicht auf der Hautoberfläche und die damit verbundene Gleichschaltung benachbarter Hautbereiche sowie die erhöhte Massenträgheit der Haut im Stechbereich die Hautoberfläche daran gehindert wird, der vordringenden Nadel auszuweichen. In praktischen Versuchen konnte eine gute Wirkung dieser Methode gezeigt werden. Durch die Verwendung geeigneter Indikatoren kann beispielsweise die Stechdichte je Hautfläche angezeigt werden. Für die praktische Anwendung muss eine geeignete, medizinisch unbedenkliche Versteifungsschicht gefunden werden. Hierzu wurden erste Vorschläge unterbreitet. Bei einem zweiten Vorschlag sind zwei, unter flachem Winkel zur Hautoberfläche und zueinander entgegengesetzt vorgeschobene Nadelanordnungen vorgesehen, wobei die Spitzen beider Werkzeugkämme unmittelbar neben- oder hintereinander auf der Haut aufgesetzt werden. Dadurch ist die Dehnbarkeit der Haut praktisch sofort erschöpft und die Spitzen dringen ohne nennenswertes Hautausweichen in das Gewebe vor. In einer großen Zahl von Versuchen konnte mit einem einfachen Labormuster die sichere Funktion und das garantiert flache Stechen demonstriert werden. Dies ist besonders für (trans-)epidermal zu applizierende Stoffe interessant, beispielsweise als vorbereitende Behandlung zur Zerstörung der Epidermisbarriere oder zum Applizieren von Substanzen in die oberen Bereiche der Dermis. Dieses Verfahren wurde zum Patent angemeldet und wird aktuell bei der Firma MT.DERM weiterentwickelt und untersucht. Eine Nutzung des Konzepts für weitere Anwendungen, beispielsweise als Pinzette für die Mikrochirurgie, wird untersucht und eine entsprechende Patentanmeldung erwogen. Beim Vakuummodul als dritten Vorschlag, die Hautelastizität zu begrenzen, ist eine in das Verbrauchsmodul integrierte Vakuumpumpe denkbar, die vor Ort und ohne zusätzlichen Aktor die Luft aus einem besonders gestalteten Raum um die Nadeldüse absaugt. Dadurch wird die Haut angehoben, und es verkleinert sich dabei gleichzeitig die Unterdruck-Wirkfläche, was dem Anheben wiederum entgegen wirkt. Zudem wird die Haut vor der eigentlichen Nadeldüse trommelfellartig gespannt, sodass das Hautausweichen beim Stechen der Nadel minimiert wird.

Zusätzlich kann die Schwingungsneigung der Haut ausgenutzt werden, um die Stechverfahren zu optimieren. Beim Ringmodul werden die Effekte bei der Ausbreitung von Oberflächenwellen bei Impulsanregung genutzt, indem die Impulsanregung ringförmig erfolgt. So bewegt sich der auf der inneren Ringseite entstehende Teil der beidseits fortgeleiteten Welle zentripetal, was eine Amplitudenerhöhung und damit verbunden eine Vorspannung der Haut bewirkt. Die gespannte Haut schlägt bei ihrer Aufwärtsbewegung mit hoher Geschwindigkeit gegen die mittig aufgehängte Nadel und wird von ihr ohne erkennbares Hautausweichen punktiert. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist die verborgene Lage der Nadel, was modernen Sicherheits-

ansprüchen gerecht wird. Bei diesem Verfahren war eine Patentanmeldung geplant. Bei der Recherche zum Stand der Technik wurden anders geartete Patentvorschläge gefunden, wobei die sehr allgemein gehaltene Formulierung der Ansprüche eine sichere Abgrenzung nur mit großen Einschränkungen zulässt und daher auf die Patentanmeldung bisher verzichtet wurde. Ein weiteres Konzept sah vor, die oberflächliche Wellenausbreitung in der Haut durch ein Stroboskop sichtbar zu machen, welches in das Stechgerät integriert und mit einem einstellbaren Punkt der Stechbewegung synchronisiert ist. Hierfür lassen sich moderne Hochleistungs-LEDs verwenden, um die Verlustwärme zu minimieren. Anhand der beobachteten Wellenausbreitung beim Probestechen kann die Arbeitsfrequenz angepasst und damit die Behandlung optimiert werden.

Bei einem zweiten Ansatz wird die gewünschte Applikationstiefe trotz des beim Punktionsvorgang auftretenden Hautausweichens durch einen Tiefenanschlag erreicht, indem die Nadelanordnung genügend weit vorgeschoben wird und aufgrund der Wirkung des Tiefenanschlags nicht über die vorbestimmte Tiefe hinaus in die Haut eindringt. Das als Stechtiefenbegrenzung bezeichnete Konzept wurde von der Firma MT.DERM zum europaweiten Patent angemeldet und wird zukünftig vor allem in Mesotherapie-Verbrauchsmodulen eingesetzt.

Als dritter Ansatz wurde die Kompensation des Hautausweichens durch Vorhalten vorgeschlagen. Dabei sollte durch die Identifikation der Parameter und eine mathematische Modellbildung das Hautausweichen vorhergesagt und bei der Einstellung der Stechtiefe automatisch Berücksichtigung finden. Wegen der interindividuellen Unterschiede und der Vielzahl an Nadelkonfigurationen und weiterer Parameter wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Ein vierter Ansatz ging davon aus, dass die Stechbewegung und die Position der Haut hoch aufgelöst und in Echtzeit durch eine elektronische Schaltung überwacht wird, sodass die Applikation des Wirkstoffs elektronisch ausgelöst erfolgt, sobald sich die Abgabeöffnung der Hohnadel während der Einstech- und / oder der Rückholbewegung auf der gewünschten Hauttiefe befindet. Dieser Ansatz wurde nicht weiter verfolgt.

Zum Abschluss der Arbeit wurde eine systematische Bewertung der einzelnen entwickelten Konzepte anhand einer modifizierten Nutzwertanalyse vorgenommen. Diese hat als besonders vorteilhafte Konzepte die Stechtiefenbegrenzung, das Kammstechverfahren, die LED-Stroboskop-Methode und die Aktorkonzepte Kurbeltrieb mit Innenlager und Stabkurbeltrieb identifiziert. Diese Konzepte lassen sich untereinander kombinieren und bedingen zudem eine Aufwertung der zuvor nicht genannten, ebenfalls hoch bewerteten Konzepte. Daher geben die dargestellten Ergebnisse der Bewertung nur einen eingeschränkten Blick auf die Ergebnisse dieser Arbeit. Eine systematische Bewertung der vielen möglichen vorteilhaften Kombinationen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass viele unterschiedliche Methoden und Verfahren entwickelt wurden, von denen einige den Stand der Technik in erfindnerischer Höhe überragen und die insbesondere für multiple Punktationen der Haut und bei geringer Stechtiefe geeignet sind, das Hautausweichen zu minimieren.

7 Literaturverzeichnis

- [SaPa12] Sanofi Pasteur, Suchbegriff „Fluzone“, Produktfoto, <http://www.sanofipasteur.com>, Abruf 23.08.2012
- [RoKo12] Robert-Koch-Institut, Suchbegriff „STIKO Empfehlung“, <http://www.rki.de>, Abruf 23.08.2012
- [MeIn12] MedizInfo, Suchbegriff „Haut und Haar“, Grafik „Mikroskopischer Aufbau der Haut“, <http://www.medizinfo.de>, Abruf 31.08.2012
- [WiEW11] Wikipedia, Suchbegriff „Epidermis (Wirbeltiere)“, Grafik „Skinlayers“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 11.05.2011
- [DeFr10] Dermatopathologie Friedrichshafen, Friedrichshafen/ Bodensee, Suchbegriff „Immunhistologie/ CD1a“, Foto „CD1a“, <http://www.dermopath.de>, Abruf 11.05.2010
- [StBo11] von Stebut-Borschitz, E., Intradermale Applikation von Impfstoffen, Vortrag und Berichtsband, <http://www.nationale-impfkonferenz.de>, 2. Nationale Impfkonferenz, Stuttgart, 2011
- [Loth11] Loth, A., Entwicklung von Verfahren und Applikatoren für den intradermalen Wirkstoffeintrag, Fachgebiet Mikrotechnik, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2011
- [MaBe07] Mang, M., Becker, A., Tipps und Tricks für den ästhetisch-plastischen Chirurgen/ Nahttechniken, kosmetische, Kombination von intradermal und intrakutan, 2007, <http://www.springerlink.com>, Abruf 08.01.2012
- [Wiik12] Wikipedia, Suchbegriff „intrakutan“, Foto „Mantoux tuberculin skin test“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 12.08.2012
- [WiSP12] Wikipedia, Suchbegriff „Smallpox“, Foto „Smallpox vaccine“, <http://en.wikipedia.org>, Abruf 30.08.2012
- [WiSV12] Wikimedia, Suchbegriff „Smallpox vaccine“, Foto „Smallpox vaccine injection“, <http://en.wikipedia.org>, Abruf 08.08.2012
- [WiWH10] Wikipedia, Suchbegriff „Wagnerscher Hammer“, Grafik „Wagnerscher Hammer“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 04.02.2010
- [Land10] Landmann, L., Entwicklung einer Mikroprozessorsteuerung für die stechtiefenkontrollierte Hautimpfung, Diplomarbeit, Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2010
- [Swash12] Swashdrive Tattoo Machines, Buderim, Österreich, Suchbegriff „Swashdrive Gen 7“, Produktkatalog, <http://www.swashdrivetattoomachines.com>, Abruf 15.08.2012

- [Loth08] Loth, A. et al., Vorrichtung zum Einbringen einer Flüssigkeit in eine menschliche oder eine tierische Haut sowie Verfahren zum Betreiben der Vorrichtung, Deutsche Patentschrift, DE 102008063040A1, <http://www.depatistnet.dpma.de>, Abruf 25.08.2012
- [PanB10] PantecBiosolutions AG, Ruggell, Liechtenstein, <http://www.pantec-biosolutions.com>, Abruf 01.09.2012
- [MeGa08] Ostrovsky, G., Painless Laser Epidermal System, MedGadget, <http://medgadget.com>, Abruf 11.05.2010
- [McAl03] McAllister, D. V. et al., Microfabricated needles for transdermal delivery of macromolecules and nanoparticles: Fabrication methods and transport studies, Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), USA, 2003, <http://www.pnas.org>, Abruf 22.02.2010
- [Saur10] H. Saur Laborbedarf, Reutlingen, Produktkatalog, <http://www.h-saur.com>, Abruf 22.02.2010
- [WiKa10] Wikipedia, Suchbegriff „Kanüle“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 22.09.2010
- [AMed12] AdminMed, nanoBioSciences, LLC, Sunny Isles Beach, Florida, USA, Produktkatalog, <http://www.adminmed.com/>, Abruf 22.08.2012
- [Dany12] Danycare GmbH & Co. KG, Hennef, <http://www.danycare.de>, Abruf 30.08.2012
- [Assa08] Assaf, A., Multiple-injection medical apparatus, weltweite Patentschrift WO2010/044064, <http://www.depatistnet.dpma.de>, Abruf 28.08.2012
- [Inter06] Intercell Inc., Vorrichtungen für die transkutane Abgabe von Vakzinen und transdermale Abgabe von Arzneimitteln, europäische Patentschrift EP 2258441A2, <http://www.depatistnet.dpma.de/>, Abruf 28.08.2012
- [Skip12] Möglichkeiten zur erleichterten Penetration der Epidermis, http://www.scf-online.com/german/37_d/skinpenetration37_d.htm, Abruf 30.08.2012
- [ZwBe08] Loth, A., Bühs, F., Zweiter Zwischenbericht zum Culex-Projekt, S. 44 - Tests zum Einstechwinkel in Haut, Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin und MT.DERM GmbH, Berlin, 2008
- [Knit99] Knittel, A., Entwicklung eines in-vitro Modells zur Charakterisierung der Kanülen-Gewebe Interaktion sowie Qualitätsbeurteilung von Kanülen in Bezug auf Gewebefragmentation mit Korrelation zu in vivo gefundenen Ergebnissen, Dissertation, Universität Ulm, 1999
- [Scho09] Scholz, S., Untersuchung und Entwicklung von Pumpsystemen für den Einsatz in DNS-Impfgeräten, Studienarbeit, Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2009
- [LaCo11] Laser Components, Olching, Positionsempfindliche Detektoren, <http://www.lasercomponents.com>, Abruf 02.03.2011

- [WiKK12] Wikipedia, Suchbegriff „Krümmungskreis“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 04.02.2012
- [WiKr12] Wikipedia, Suchbegriff „Krümmung“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 04.02.2012
- [Zorn12] Zorn, W., WZ-Grapher V0.95, <http://www.walterzorn.de>, Abruf 03.02.2012
- [WiKF12] Wikipedia, Suchbegriff „Knackfrosch“, Foto „Knackente Oberseite DB“ und „Knackente Unterseite DB“, <http://de.wikipedia.org>, Abruf 31.03.2012
- [Frank12] Franken-Chemie GmbH & Co. KG, Lage, Produktkatalog, <http://www.frankengmbh.de>, Abruf 05.08.2012
- [Demj12] Demjanenko, D., Entwicklung eines elektrodynamischen, linearen Schwingaktors und das Verfahren zu dessen Steuerung und Regelung, Dissertation, Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2012
- [KaLe11] Katzenlexikon (online), Foto „Katzenzunge“, <http://www.tiermarkt-4u.de>, Abruf 22.02.2011
- [Mayn05] Maynard, K., Imprint Pharmaceuticals Ltd., Artikel in: “Prefilled syringes - innovations that meet the growing demand”, ONdrugDelivery Ltd, Newtimber, West Sussex, United Kingdom, 2005, <http://www.management-forum.co.uk>, Abruf 30.08.2012
- [Boeh97] Boehringer GmbH, Mannheim / Böcker, D. et al., Schneidevorrichtung für Haut zur schmerzarmen Gewinnung kleiner Blutmengen, weltweite Patentschrift WO 97/28741, <http://www.depatistnet.dpma.de>, Abruf 28.08.2012
- [Clem11] Clemen, C., Vorlesungen: Felder und Wellen, Foto „Foto von einer Wasserwelle“, <http://www.hs-augsburg.de>, Abruf 23.02.2011
- [MüHe07] Müller-Herbers, S., Methoden zur Beurteilung von Varianten, 4. Auflage, Universität Stuttgart, Arbeitspapier, <http://www.igp.uni-stuttgart.de>, Abruf 23.08.2012
- [InCo12] InnoCore Technologies, Groningen, Niederlande, <http://www.innocore.nl/>, Abruf 30.08.2012
- [Deli12] Deliverics Ltd., Edinburgh, United Kingdom, <http://www.deliverics.com>, Abruf 30.08.2012

8 Anhang

Im Folgenden sind die Formeln zur Beschreibung der Kinematik der Querkurbeltrieb-Varianten 1 bis 9 zur Vertiefung des im Kapitel 4.1.4 Gesagten wiedergegeben.

Des Weiteren werden die detaillierte Ziel-Kriterien-Struktur zur Bewertung der Konzepte, sämtliche gewichteten Paarvergleichsmatrizen und die Bewertungstabelle zwecks Dokumentation wiedergegeben.

8.1 QKT-Variante 1

„Pleulfester Gleitstift gleitet in einer Nut im Gehäuse“: Der Stell- oder Gleitstift C in der Abbildung 8-1 ist im Abstand l_1 vom unteren Pleuelaage B entfernt fest mit dem Pleuel verbunden. Der Stift gleitet in einer Nut in der Wand des Gehäuses, die bezüglich der Abszisse unter einem Höhenwinkel δ in Richtung AC verläuft.

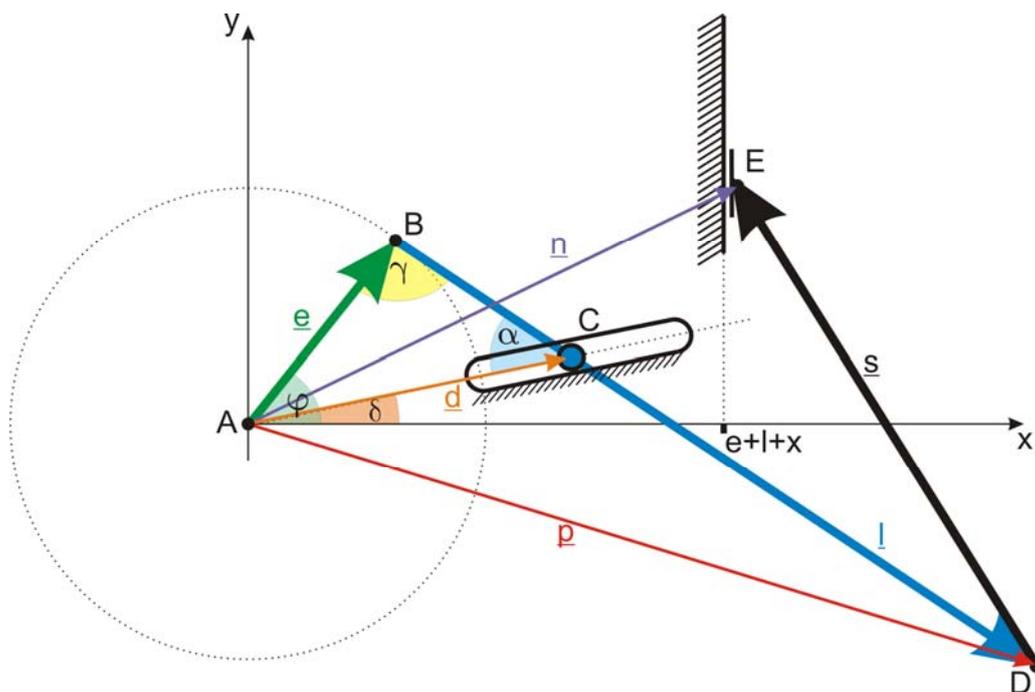


Abb. 8-1 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 1

Der Winkel δ sei einstellbar, aber als zeitlich konstant anzusehen. Er stellt die Variable für die Hubeinstellung dar. Das Bezugskoordinatensystem hat seinen Ursprung in der Symmetrieachse der Motorwelle, dem Punkt A. Der Vektor \underline{e} stellt die Verbindung zwischen dem Punkt A und dem Mittelpunkt des unteren Pleuelauges B dar. Sein Betrag sei e und zeitlich konstant. Der Vektor \underline{d} stellt die Koordinaten des Gleitstifts C dar, sein Betrag sei d und zeitlich veränderlich. Er schließt den Höhenwinkel δ mit der Abszisse ein. Der Vektor \underline{l} verbindet das untere Pleuelaage B mit dem oberen Pleuelaage D über den Gleitstift C hinweg. Der Betrag von \underline{l} sei l . Der Abstand BC ist dabei ein Teilstück von \underline{l} und wird mit l_1 bezeichnet. Der Vektor \underline{p} zeigt auf die Koordinaten des oberen Pleuelauges D. Der Vektor \underline{s} stellt die Längsachse der

Schubstange DE dar, welche das obere Pleuelauge D mit dem Kolben E verbindet. Die Länge der Schubstange wurde mit l_s bezeichnet. Der Kolben, welcher die Nadel aufnehmen soll, besitzt eine feste x-Koordinate, lediglich die y-Koordinate ist zeitvariant. Der Vektor \underline{n} zeigt dabei auf die Koordinaten des Kolbens im Koordinatensystem, Abbildung 8-1.

Die Abhängigkeit des Kurbelwinkels $\varphi(t)$ von der Zeit t wird vereinfachend als linear angenommen und damit folgende Beziehung zur konstanten Winkelgeschwindigkeit ω_0 erhalten, wobei die geforderte Stechfrequenz mit f , die daraus abgeleitete Periodendauer mit T bezeichnet wird.

$$\varphi(t) = 2\pi \cdot f \cdot t = \frac{2\pi}{T} \cdot t = \omega_0 \cdot t \quad \text{mit } \omega_0 = \text{const.} \quad (8-1)$$

Es lässt sich der zeitabhängige Kurbelvektor \underline{e} schreiben als

$$\bar{e}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) & -\sin(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) & \cos(\varphi(t)) \end{bmatrix}}_{\text{2D-Drehmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Vektor } e_0} = e \cdot \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t)) \\ \sin(\varphi(t)) \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

mit $e = \text{const.}$

Der in seinem Betrag zeitveränderliche Vektor \underline{d} , welcher vom Koordinatenursprung A zum Gleitstift C zeigt, ergibt sich unter Anwendung des Sinussatzes für beliebige Dreiecke und der Beziehung für die Innenwinkelsumme zu:

$$\bar{d}(t, \delta) = \underbrace{\sqrt{e^2 + l_1^2 - 2 \cdot e \cdot l_1 \cdot \cos(\gamma(t))}}_{= |\bar{d}(t, \delta)|; \text{ folgt aus dem Kosinussatz für beliebige Dreiecke}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\delta) \\ \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (8-3)$$

mit $e, l_1, \delta = \text{const.}$

$$\text{mit } \gamma(t) = \pi - \underbrace{\left(\underbrace{\arcsin \left(\underbrace{\frac{e}{l_1} \cdot \sin(\varphi(t) - \delta)}_{= \sin(\alpha), \text{ Sinussatz}} \right)}_{= \alpha, \text{ Innenwinkel 1}} \right)}_{\text{folgt aus Innenwinkelsumme im beliebigen Dreieck}} + \underbrace{(\varphi(t) - \delta)}_{\text{Innenwinkel 2}}$$

Somit lässt sich der Vektor \underline{l} unter Verwendung seines Betrags l und des mit l_1 bekannten festen Abstands BC errechnen:

$$\bar{l}(t, \delta) = l \cdot \underbrace{\frac{\bar{d}(t, \delta) - \bar{e}(t)}{l_1}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l, l_1, \delta = \text{const.} \quad (8-4)$$

Es ergibt sich der Ortsvektor \underline{p} des oberen Pleuelauges D im Koordinatensystem:

$$\bar{p}(t, \delta) = \bar{l}(t, \delta) + \bar{e}(t) \quad (8-5)$$

Der Lagevektor \underline{s} der Schubstange bildet mit der Vertikalen durch den Punkt E und mit der Horizontalen durch den Punkt D ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mit dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannten Länge l_s und der festen x -Position des Punktes E ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors \underline{p} und x einen frei wählbaren Wert für den horizontalen Versatz des Kolbens von der x -Bezugslage $e + l$ darstellen:

$$\bar{s}(t, \delta) = \left[\frac{e + l + x - p_x(t, \delta)}{\sqrt{l_s^2 - (e + l + x - p_x(t, \delta))^2}} \right] \quad (8-6)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

Als Summe der Vektoren \underline{p} und \underline{s} ergibt sich schließlich der Vektor \underline{n} des Kolbens im Koordinatensystem:

$$\bar{n}(t, \delta) = \bar{s}(t, \delta) + \bar{p}(t, \delta)$$

$$\bar{n}(t, \delta) = \left[\frac{e + l + x}{\sqrt{l_s^2 - (e + l + x - p_x(t, \delta))^2}} + p_y(t, \delta) \right] \quad (8-7)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

8.3 QKT-Variante 3

„Pleulfester Gleitstift ist drehbar wandfest gelagert, Kurbel gleitet auf Pleuellängsachse“: Die Kapitelüberschrift legt das Grundprinzip dieser Variante bereits dar, siehe Abbildung 8-3. Die Eigenschaft einer Kurbel mit Gleithülse B kann bei kleiner Exzentrizität e beispielsweise auch durch ein Langloch-Pleuelauge mit parallelen Gleitflächen gebildet werden, in welchem eine seitlich spielfrei passende Zylinderscheibe mit einer Exzentrizität e um den Punkt A gleitend rotiert, wobei die Lastseite entsprechend wechselt.

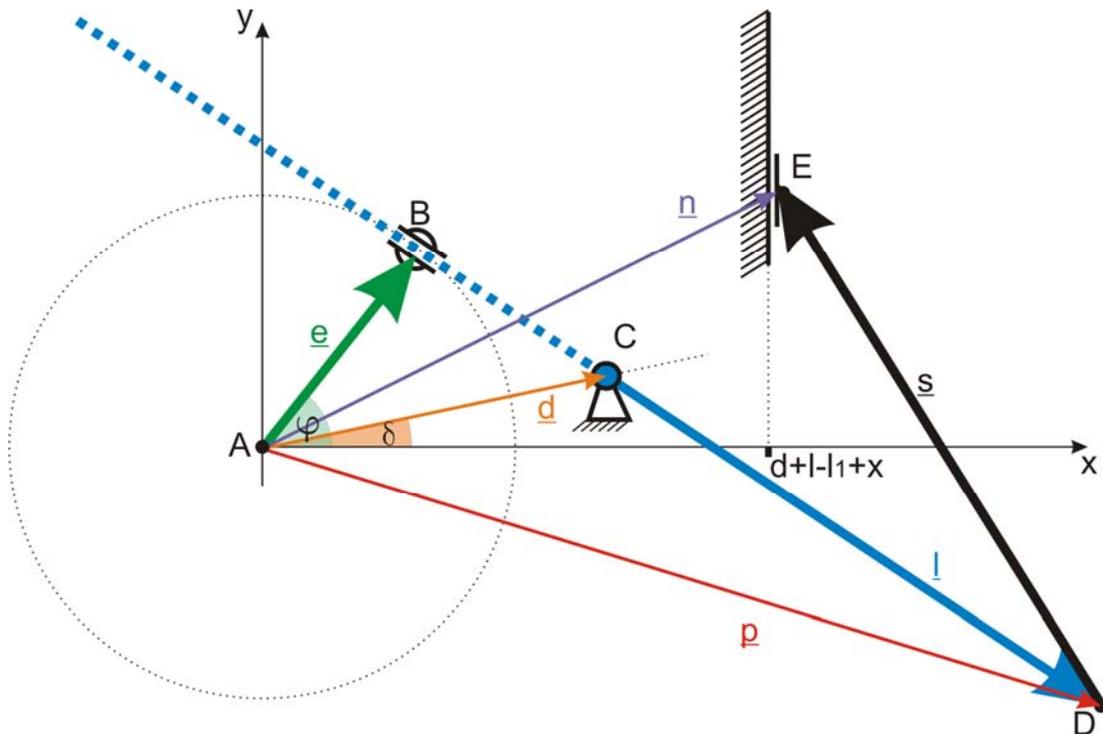


Abb. 8-3 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 3

Das Bezugskordinatensystem hat seinen Ursprung in der Symmetrieachse der Motorwelle, dem Punkt A. Der Vektor \underline{e} stellt die Verbindung zwischen dem Punkt A und dem Mittelpunkt der Hülse B auf der Kurbelscheibe dar. Sein Betrag sei e und zeitlich konstant. Der Vektor \underline{l} verbindet den Gleitstift C mit dem oberen Pleuelauge D. Der Betrag von \underline{l} sei berechnet als die Differenz aus l und l_1 und zeitlich konstant. Der Vektor \underline{d} stellt die Koordinaten des Gleitstifts C dar. Er ist zeitlich konstant, sein Betrag sei d . Er schließt den Höhenwinkel δ mit der Abszisse ein. Der Winkel δ sei einstellbar, aber ebenfalls als zeitlich konstant anzusehen. Er stellt die Variable für die Hubverstellung dar. Der Vektor \underline{p} zeigt auf die Koordinaten des oberen Pleuelauges D. Der Vektor \underline{s} stellt die Längsachse der Schubstange DE dar, welche das obere Pleuelauge D mit dem Kolben E verbindet. Der Kolben, welcher die Nadel aufnehmen soll, besitzt eine feste x -Koordinate, lediglich die y -Koordinate ist zeitvariant. Der Vektor \underline{n} zeigt dabei auf die Koordinaten des Kolbens bezüglich des Koordinatensystems.

Somit lässt sich der Vektor \underline{l} unter Verwendung der bekannten Werte l und l_1 errechnen:

$$\vec{l}(t, \delta) = (1 - l_1) \cdot \underbrace{\frac{\vec{d}(\delta) - \vec{e}(t)}{|\vec{d}(\delta) - \vec{e}(t)|}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l, l_1 = \text{const.} \quad (8-9)$$

Es ergibt sich der Ortsvektor \underline{p} des oberen Pleuelauges D im Koordinatensystem:

$$\vec{p}(t, \delta) = \vec{l}(t, \delta) + \vec{d}(\delta) \quad (8-10)$$

Der Lagevektor \underline{s} der Schubstange bildet mit der Vertikalen durch den Punkt E und mit der Horizontalen durch den Punkt D ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mit dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannten Länge l_s und der festen x-Position des Punktes E ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors \underline{p} und x einen frei wählbaren Wert für den horizontalen Versatz des Kolbens von der ($x = 0$)-Bezugslage $d + (1 - l_1)$ darstellen:

$$\vec{s}(t, \delta) = \left[\frac{d + 1 - l_1 + x - p_x(t, \delta)}{\sqrt{l_s^2 - (d + 1 - l_1 + x - p_x(t, \delta))^2}} \right] \quad (8-11)$$

mit $e, l, l_1, x, l_s = \text{const.}$

Als Summe der Vektoren \underline{p} und \underline{s} ergibt sich schließlich der Vektor \underline{n} des Kolbens im Koordinatensystem:

$$\vec{n}(t, \delta) = \vec{s}(t, \delta) + \vec{p}(t, \delta)$$

$$\vec{n}(t, \delta) = \left[\frac{d + 1 - l_1 + x}{\sqrt{l_s^2 - (d + 1 - l_1 + x - p_x(t, \delta))^2}} + p_y(t, \delta) \right] \quad (8-12)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

Der nicht erneut dargestellte Ortsvektor \underline{e} sowie der Geschwindigkeitsvektor \underline{v} des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\varphi}$ lassen sich wie bei der Variante 1 ermitteln, siehe dort.

8.4 QKT-Variante 4

„Pleuefester Gleitstift ortsfest drehbar in Gehäusewand, Motorwelle gleitet in Gehäusenut“:
Anmerkung: Diese Variante ist zwar nur schwer realisierbar, dennoch soll sie zu Vergleichszwecken untersucht werden.

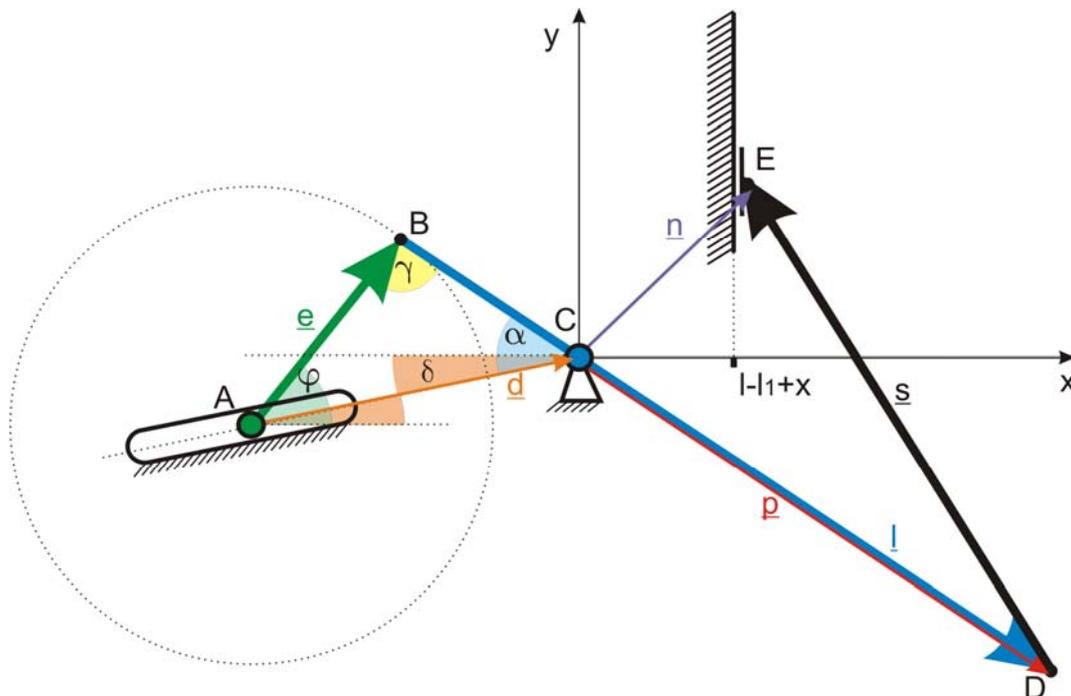


Abb. 8-4 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 4

Die Nut in der Gehäusewand sei verstellbar und verlaufe unter einem Winkel δ bezüglich der negativen Abszisse. Das Bezugskoordinatensystem hat seinen Ursprung im Gleitstift, dem Punkt C. Der Vektor \underline{e} stellt die Verbindung zwischen dem Punkt A und dem unteren Pleuelauge, Punkt B, dar. Sein Betrag sei e und zeitlich konstant. Der Vektor \underline{l} stellt die schematische Reduktion des Pleuels dar und verbindet den Punkt B über den Gleitstift C hinweg mit dem Punkt D. Der Betrag von \underline{l} sei l , der vom Abstand BC sei l_1 , beide seien zeitlich konstant. Der Vektor \underline{d} stellt die invertierten Koordinaten der Motorwelle A dar und besitzt somit positive Komponenten, sein Betrag sei d und zeitlich veränderlich. Er schließt den Höhenwinkel δ mit der Abszisse ein. Der Winkel δ sei einstellbar, aber als zeitlich konstant anzusehen. Er stellt die Variable für die Hubverstellung dar. Der Vektor \underline{p} zeigt auf die Koordinaten des oberen Pleuelauges D. Der Vektor \underline{s} stellt die Längsachse der Schubstange DE dar, welche das obere Pleuelauge D mit dem Kolben E verbindet. Der Kolben, welcher unter anderem die Nadel aufnehmen soll, besitzt eine feste x-Koordinate, lediglich die y-Koordinate ist zeitvariant. Der Vektor \underline{n} zeigt dabei auf die Koordinaten des Kolbens bezüglich des Koordinatensystems.

Wegen der Ähnlichkeit zur Variante 1 werden hier lediglich die abweichenden Vektoren dargestellt. Die Verhältnisse am Dreieck ABC sind unverändert geblieben. Jedoch unterscheidet sich der Vektor \underline{p} :

$$\bar{\mathbf{p}}(t, \delta) = (1 - l_1) \cdot \underbrace{\frac{\bar{\mathbf{d}}(t, \delta) - \bar{\mathbf{e}}(t)}{l_1}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l, l_1 = \text{const.} \quad (8-13)$$

Damit ergeben sich auch Änderungen an den von $\underline{\mathbf{p}}$ abhängigen Vektoren. Der Lagevektor $\underline{\mathbf{s}}$ der Schubstange bildet mit der Vertikalen durch den Punkt E und mit der Horizontalen durch den Punkt D ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mit dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannten Länge l_s und der festen x-Position des Punktes E ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors $\underline{\mathbf{p}}$ und x einen frei wählbaren Wert für den horizontalen Versatz des Kolbens von der x-Bezugslage $l - l_1$ darstellen:

$$\bar{\mathbf{s}}(t, \delta) = \left[\frac{l - l_1 + x - p_x(t, \delta)}{\sqrt{l_s^2 - (l - l_1 + x - p_x(t, \delta))^2}} \right] \quad (8-14)$$

mit $l, l_1, x, l_s = \text{const.}$

Als Summe der Vektoren $\underline{\mathbf{p}}$ und $\underline{\mathbf{s}}$ ergibt sich schließlich der Vektor $\underline{\mathbf{n}}$ des Kolbens im Koordinatensystem:

$$\bar{\mathbf{n}}(t, \delta) = \bar{\mathbf{s}}(t, \delta) + \bar{\mathbf{p}}(t, \delta)$$

$$\bar{\mathbf{n}}(t, \delta) = \left[\frac{l - l_1 + x}{\sqrt{l_s^2 - (l - l_1 + x - p_x(t, \delta))^2}} + p_y(t, \delta) \right] \quad (8-15)$$

mit $l, l_1, x, l_s = \text{const.}$

Die nicht erneut dargestellten Ortsvektoren $\underline{\mathbf{e}}$, $\underline{\mathbf{l}}$ und $\underline{\mathbf{d}}$ sowie der Geschwindigkeitsvektor $\underline{\mathbf{v}}$ des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\mathbf{q}}$, lassen sich wie bei der Variante 1 ermitteln, siehe dort.

8.5 QKT-Variante 5

Bei der grundlegenden Variante liegt die Fesselung des Pleuels außerhalb der Antriebs-Abtriebs-Verbindung. In allen anderen Punkten gilt das zu Variante 3 Gesagte. Eine bezüglich der Abtriebsrichtung modifizierte Variante 5 wurde im Kapitel 4.1.4, Abschnitt „Prototyp 2 (QKT-Redesign)“ beschrieben, siehe dort.

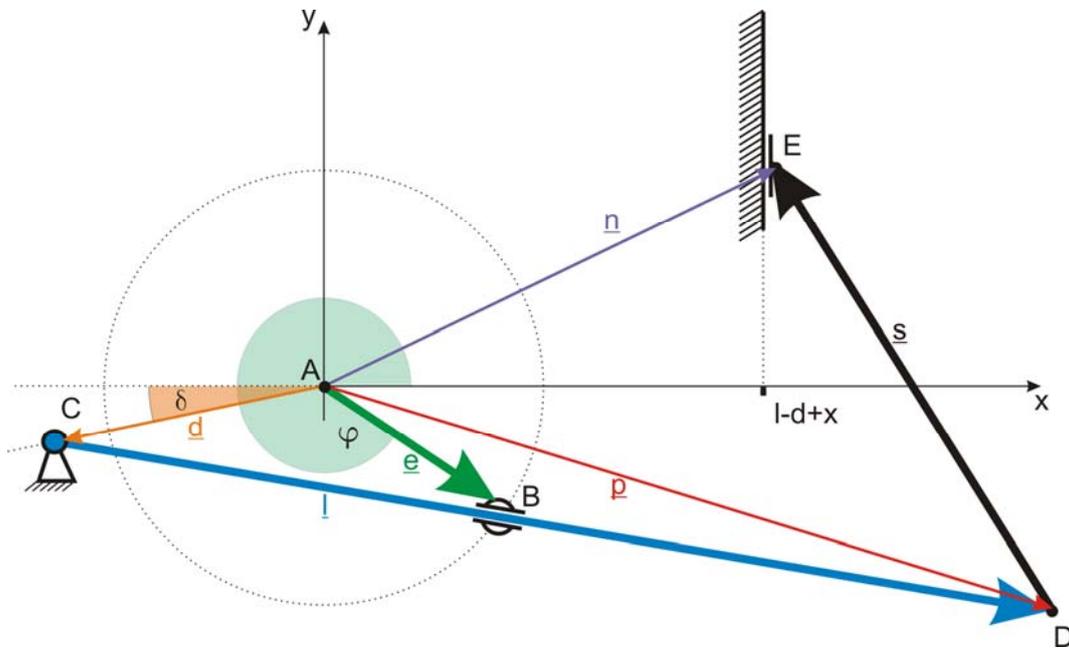


Abb. 8-5 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 5

Der hier zeitlich konstante Vektor \underline{d} , welcher vom Koordinatenursprung A zum Gleitstift C zeigt, ergibt sich zu:

$$\bar{\underline{d}}(\delta) = d \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\delta) \\ -\sin(\delta) \end{bmatrix} \quad \text{mit } d, \delta = \text{const.} \quad (8-16)$$

Somit lässt sich der Vektor \underline{l} unter Verwendung seines Betrags l errechnen:

$$\bar{\underline{l}}(t, \delta) = l \cdot \underbrace{\frac{\bar{\underline{e}}(t) - \bar{\underline{d}}(\delta)}{|\bar{\underline{e}}(t) - \bar{\underline{d}}(\delta)|}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l = \text{const.} \quad (8-17)$$

Es ergibt sich der Ortsvektor \underline{p} des oberen Pleuelauges D im Koordinatensystem:

$$\vec{p}(t, \delta) = \vec{l}(t, \delta) + \vec{d}(\delta) \quad (8-18)$$

Der Lagevektor \underline{s} der Schubstange bildet mit der Vertikalen durch den Punkt E und mit der Horizontalen durch den Punkt D ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mit dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannten Länge l_s und der festen x-Position des Punkts E ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors \underline{p} und x einen frei wählbaren Wert für den horizontalen Versatz des Kolbens von der x-Bezugslage $l - d$ darstellen:

$$\vec{s}(t, \delta) = \left[\begin{array}{c} 1 - d + x - p_x(t, \delta) \\ \sqrt{l_s^2 - (1 - d + x - p_x(t, \delta))^2} \end{array} \right] \quad (8-19)$$

mit $d, l, x, l_s = \text{const.}$

Als Summe der Vektoren \underline{p} und \underline{s} ergibt sich schließlich der Vektor \underline{n} des Kolbens im Koordinatensystem:

$$\vec{n}(t, \delta) = \vec{s}(t, \delta) + \vec{p}(t, \delta)$$

$$\vec{n}(t, \delta) = \left[\begin{array}{c} 1 - d + x \\ \sqrt{l_s^2 - (1 - d + x - p_x(t, \delta))^2} + p_y(t, \delta) \end{array} \right] \quad (8-20)$$

mit $d, l, x, l_s = \text{const.}$

Der nicht erneut dargestellte Ortsvektor \underline{e} sowie der Geschwindigkeitsvektor \underline{v} des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\varphi}$, lassen sich wie bei der Variante 1 ermitteln, siehe dort.

8.6 QKT-Variante 6

Bei dieser Variante liegt die Fesselung des Pleuels außerhalb der Antriebs-Abtriebs-Verbindung. In allen anderen Punkten gilt das zur Variante 1 Gesagte, siehe Abbildung 8-6.

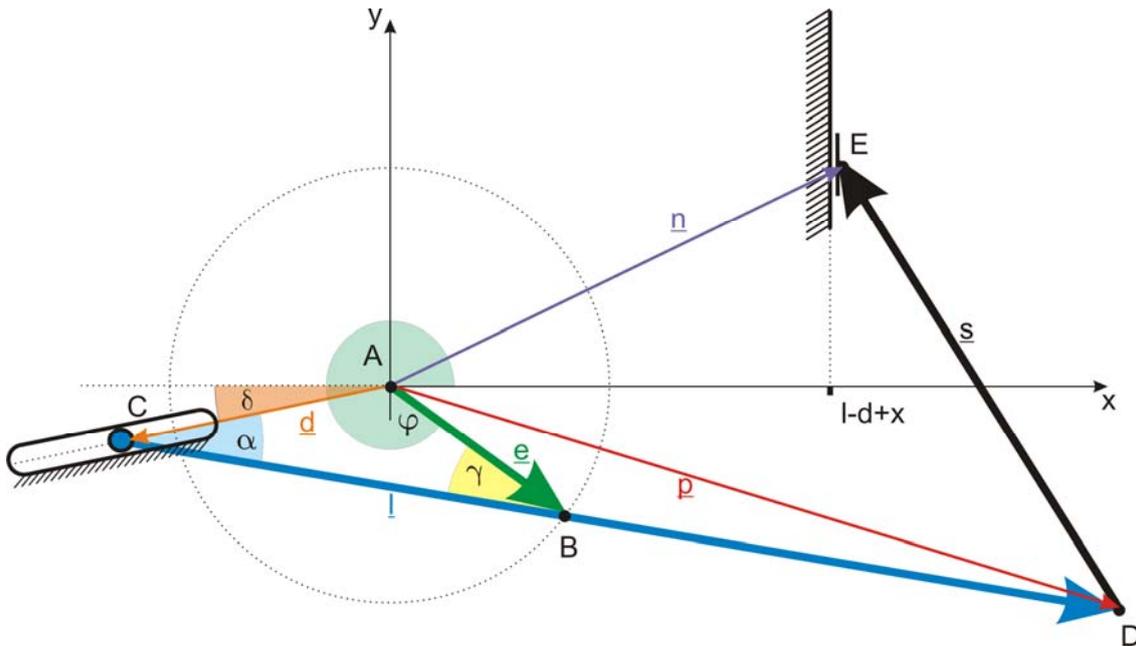


Abb. 8-6 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 6

Wegen der veränderten Gestalt des aufgespannten Dreiecks ABC im Vergleich zu Variante 1 müssen die Winkelbeziehungen angepasst werden.

Der in seinem Betrag zeitveränderliche Vektor \underline{d} , welcher vom Koordinatenursprung A zum Gleitstift C zeigt, ergibt sich unter Anwendung des Sinussatzes für beliebige Dreiecke und der Beziehung für die Innenwinkelsumme zu:

$$\vec{d}(t, \delta) = \sqrt{e^2 + l_1^2 - 2 \cdot e \cdot l_1 \cdot \cos(\gamma(t))} \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\delta) \\ -\sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (8-21)$$

$= |\vec{d}(t, \delta)|$; folgt aus dem Kosinussatz für beliebige Dreiecke

mit $e, l_1, \delta = \text{const.}$

$$\text{mit } \gamma(t) = \pi - \left(\underbrace{\arcsin \left(\underbrace{\frac{e}{l_1} \cdot \sin(\varphi(t) - \pi - \delta)}_{= \sin(\alpha), \text{ Sinussatz}} \right)}_{= \alpha, \text{ Innenwinkel 1}} + \underbrace{(\varphi(t) - \pi - \delta)}_{\text{Innenwinkel 2}} \right)$$

folgt aus Innenwinkelsumme im beliebigen Dreieck

Somit lässt sich der Vektor \underline{l} unter Verwendung seines Betrags l und des mit l_1 bekannten festen Abstands BC errechnen:

$$\bar{\mathbf{l}}(t, \delta) = l_1 \cdot \underbrace{\frac{\bar{\mathbf{e}}(t) - \bar{\mathbf{d}}(t, \delta)}{|\bar{\mathbf{e}}(t) - \bar{\mathbf{d}}(t, \delta)|}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l, l_1 = \text{const.} \quad (8-22)$$

Es ergibt sich der Ortsvektor $\underline{\mathbf{p}}$ des oberen Pleuelauges D im Koordinatensystem:

$$\bar{\mathbf{p}}(t, \delta) = \bar{\mathbf{l}}(t, \delta) + \bar{\mathbf{d}}(t, \delta) \quad (8-23)$$

Der Lagevektor $\underline{\mathbf{s}}$ der Schubstange bildet mit der Vertikalen durch den Punkt E und mit der Horizontalen durch den Punkt D ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mit dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannten Länge l_s und der festen x-Position des Punktes E ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors $\underline{\mathbf{p}}$ und x einen frei wählbaren Wert für den horizontalen Versatz des Kolbens von der x-Bezugslage $e + l$ darstellen:

$$\bar{\mathbf{s}}(t, \delta) = \left[\begin{array}{c} 1 - d + x - p_x(t, \delta) \\ \sqrt{l_s^2 - (1 - d + x - p_x(t, \delta))^2} \end{array} \right] \quad (8-24)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

Als Summe der Vektoren $\underline{\mathbf{p}}$ und $\underline{\mathbf{s}}$ ergibt sich schließlich der Vektor $\underline{\mathbf{n}}$ des Kolbens im Koordinatensystem:

$$\bar{\mathbf{n}}(t, \delta) = \bar{\mathbf{s}}(t, \delta) + \bar{\mathbf{p}}(t, \delta)$$

$$\bar{\mathbf{n}}(t, \delta) = \left[\begin{array}{c} 1 - d + x \\ \sqrt{l_s^2 - (1 - d + x - p_x(t, \delta))^2} + p_y(t, \delta) \end{array} \right] \quad (8-25)$$

mit $e, l, x, l_s = \text{const.}$

Der nicht erneut dargestellte Ortsvektor \underline{e} sowie der Geschwindigkeitsvektor \underline{v} des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\varphi}$, lassen sich wie bei der Variante 1 ermitteln, siehe dort.

8.7 QKT-Variante 7

Das Prinzip dieser Variante beruht darauf, dass der Gleitstift C die Eigenschaften bzw. Zwangsbedingungen der ersten Variante anteilig mit der zweiten kombiniert.

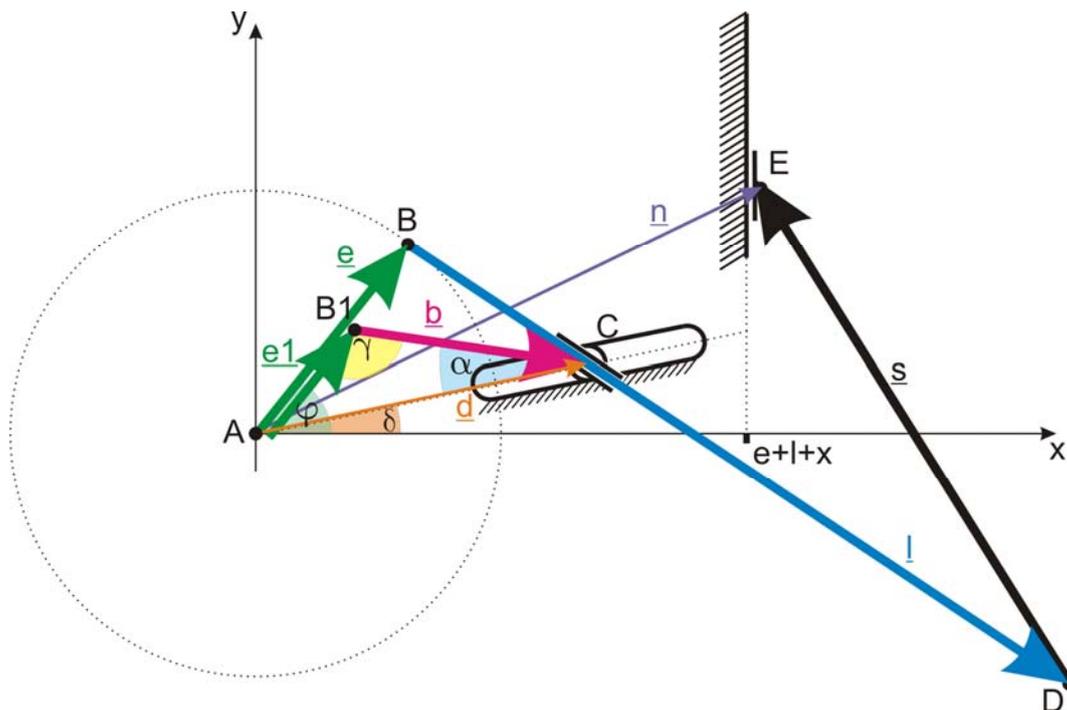


Abb. 8-7 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 7 ohne Phasenverschiebung λ zwischen \underline{e} und \underline{e}_1

Um dies zu bewirken, existiert ein Hilfspleuel B_1C bzw. \underline{b} , welches die Gleitbewegung des Gleitstifts C erzwingt. Der Gleitstift C gleitet sowohl in einer Nut in der Wand, die bezüglich der Nulllage unter einem Höhenwinkel δ längs in Richtung AC verläuft, als auch auf der Längsachse des Pleuels, z.B. in einer Nut im Pleuel. Der Winkel δ sei einstellbar, aber als zeitlich konstant anzusehen. Er stellt die Variable für die Hubverstellung dar. Das Bezugskordinatensystem hat seinen Ursprung in der Symmetrieachse der Motorwelle, dem Punkt A. Der Vektor \underline{e} stellt die Verbindung zwischen dem Punkt A und dem Mittelpunkt des unteren Pleuelauges B des Hauptpleuels \underline{l} dar. Sein Betrag sei e und zeitlich konstant. Der Vektor \underline{e}_1 stellt die Verbindung zwischen dem Punkt A und dem Mittelpunkt des unteren Pleuelauges B_1 des Hilfspleuels \underline{b} dar. Sein zeitlich konstanter Betrag sei e_1 , ein prozentualer und konstruktiv festzulegender Anteil von e . Der Vektor \underline{b} stellt schematisch ein Hilfspleuel dar, sein Betrag sei b und errechnet sich zu $b = e + l_1 - e_1$. Der Vektor \underline{d} stellt die Koordinaten des Gleitstifts C dar, sein Betrag sei d und zeitlich veränderlich. Er schließt den oben genannten Höhenwinkel δ mit der Abszisse ein. Der Vektor \underline{l} stellt die schematische Reduktion des Hauptpleuels dar und verbindet den Punkt B über den Gleitstift C hinweg mit dem Punkt D. Der Betrag von \underline{l}

sei l . Der Vektor \underline{p} zeigt auf die Koordinaten des oberen Hauptpleuelauges D. Der Vektor \underline{s} stellt die Längsachse der Schubstange DE dar, welche das obere Hauptpleuelaug D mit dem Kolben E verbindet, sein Betrag sei l_s . Der Kolben E, welcher unter anderem die Nadel aufnehmen soll, besitzt eine feste x-Koordinate, lediglich die y-Koordinate ist zeitvariant. Der Vektor \underline{n} zeigt dabei auf die Koordinaten des Kolbens E bezüglich des Koordinatensystems.

Wegen des größeren baulichen Aufwands - es sind mehr bewegliche Teile und damit Fehlerquellen im System - ist die Realisierbarkeit schwieriger als bei den Grundvarianten 1 bis 4.

Die Auswirkung einer zeitlich konstanten, nicht verschwindenden Phasenbeziehung λ zwischen \underline{e} und \underline{e}_1 wurde hier nicht untersucht, könnte sich jedoch als vorteilhaft erweisen. Ebenso eine andere Länge b für das Hilfspleuel. Der erstgenannte Ansatz ist in der Abbildung 8-8 veranschaulicht. Dabei sind für λ sowohl positive als auch negative Werte denkbar.

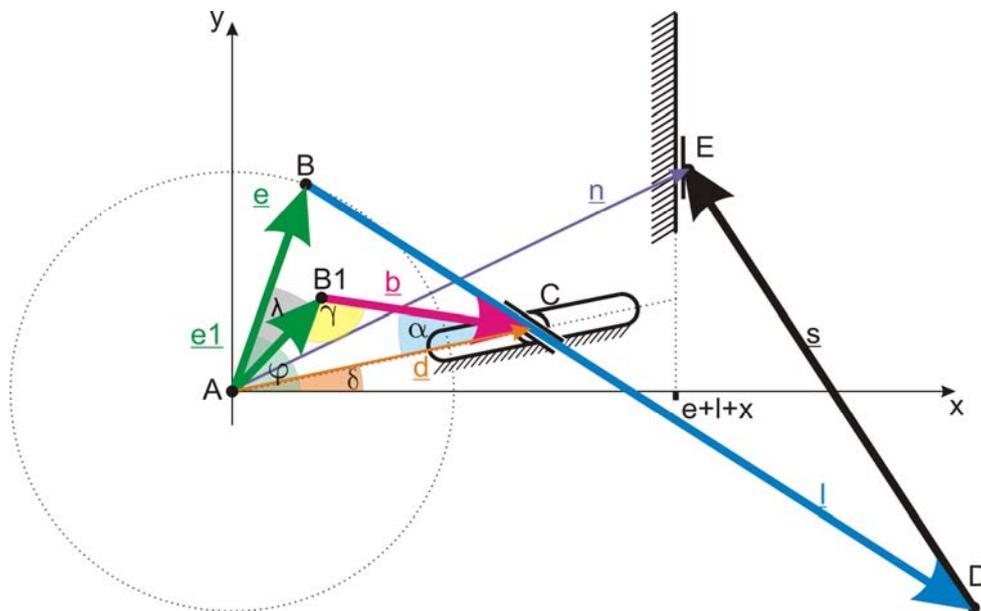


Abb. 8-8 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 7 mit zusätzlicher Phasenverschiebung λ zwischen \underline{e} und \underline{e}_1

Der in seinem Betrag zeitveränderliche Vektor \underline{d} , welcher vom Koordinatenursprung A zum Gleitstift C zeigt, ergibt sich in Anlehnung an die Variante 1 unter Anwendung des Sinussatzes für beliebige Dreiecke, der Beziehung für die Innenwinkelsumme sowie der Einbeziehung einer nicht verschwindenden Phasenbeziehung λ zu:

$$\vec{d}(t, \delta) = \underbrace{\sqrt{e_1^2 + b^2 - 2 \cdot e_1 \cdot b \cdot \cos(\gamma(t))}}_{= |\vec{d}(t, \delta)|; \text{ folgt aus dem Kosinussatz für beliebige Dreiecke}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\delta) \\ \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (8-26)$$

$$\text{mit } b = e - e_1 + l_1$$

$$\text{mit } e_1, b, \delta = \text{const.}$$

$$\text{mit } \gamma(t) = \pi - \underbrace{\left(\underbrace{\arcsin \left[\frac{e}{l_1} \cdot \sin(\varphi(t) - \lambda - \delta) \right]}_{= \sin(\alpha), \text{ Sinussatz}} + \underbrace{(\varphi(t) - \lambda - \delta)}_{\text{Innenwinkel 2}} \right)}_{= \alpha, \text{ Innenwinkel 1}} \quad \text{folgt aus Innenwinkelsumme im beliebigen Dreieck}$$

Somit lässt sich der Vektor \underline{l} ähnlich zur Variante 2 unter Verwendung seines Betrags l er-
rechnen:

$$\bar{\mathbf{l}}(t, \delta) = l \cdot \underbrace{\frac{\bar{\mathbf{d}}(t, \delta) - \bar{\mathbf{e}}(t)}{|\bar{\mathbf{d}}(t, \delta) - \bar{\mathbf{e}}(t)|}}_{= \text{normierter Vektor in Pleuelrichtung}} \quad \text{mit } l = \text{const.} \quad (8-27)$$

Die nicht erneut dargestellten Ortsvektoren \underline{e} , \underline{p} , \underline{s} und \underline{n} sowie der Geschwindigkeitsvektor \underline{v} des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\varphi}$, lassen sich wie bei Variante 1 ermitteln, siehe dort.

8.8 QKT-Variante 8

Im Unterschied zu Variante 2 gleitet hier eine um den Betrag p parallel zur Pleuellängsachse versetzte Hilfsachse in einer drehbar gelagerten, wandfesten Hülse. Damit gehen beide Varianten bei $p = 0$ ineinander über. Die schematischen Vektorbeziehungen sind in der Abbildung 8-9 dargestellt.

Bei dieser Variante war die Modellbildung ein wenig aufwendiger. Stellt man sich jedoch den Pleuel reduziert auf ein Rechteck vor, welches auf einer Gleitrolle C mit infinitesimalem Durchmesser aufliegt, so vereinfacht sich die Vektorerstellung.

Es wird angenommen, dass die Vektoren \underline{e} , \underline{d} und damit \underline{v} sowie deren Beträge jederzeit bekannt seien, vgl. hierzu die Abbildung 8-9. Der Betrag q des Vektors \underline{q} sei ebenfalls bekannt, denn q stellt den konstruktiv gewünschten Parallelversatz dar. Die Vektoren \underline{v} , \underline{q} und \underline{z} spannen ein rechtwinkliges Dreieck auf. Somit kann die Arcussinusfunktion verwendet werden, um den Winkel ζ zu berechnen. Dieser tritt wegen der Parallelität von \underline{z} und \underline{l} als Wechselwinkel ebenfalls zwischen \underline{v} und \underline{l} auf. Damit muss, um den Vektors \underline{l} zu erhalten, abschließend der Vektor \underline{v} auf die Länge 1 normiert, um ζ im positiven Sinn gedreht und mit dem Betrag l skaliert werden. Der so erhaltene Vektor \underline{l} stellt wie bei den Varianten zuvor die Verbindung BD her. Die übrigen Verhältnisse und Vektoren berechnet man wie bereits in der Variante 1.

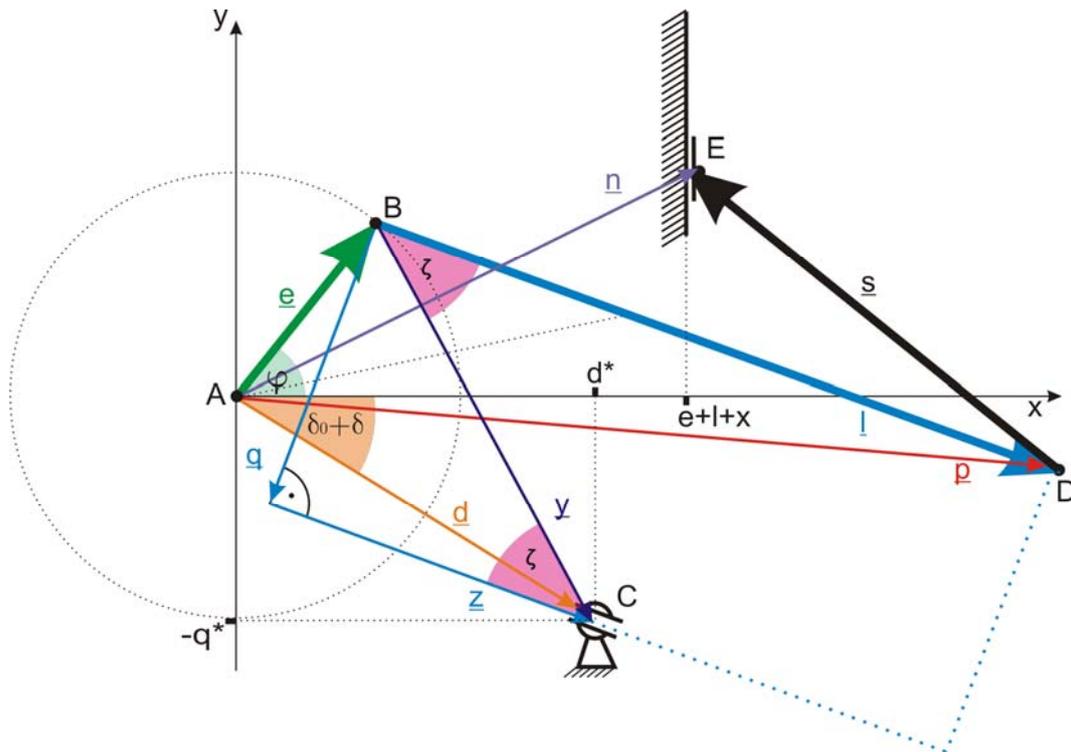


Abb. 8-9 Schematische Darstellung der vektoriellen Verhältnisse bei der Variante 8

Für den Vektor \underline{d} gilt, dass bei $\delta = 0$ der Vektor mit der positiven Abszisse einen Winkel δ_0 einschließt. Seine Koordinaten sind in diesem Fall $(d, -q)$, wobei q aus der konstruktiven Vorgabe und d aus der Berechnung $d = e + l_1$ erhalten werden. Für einen Höhenwinkel δ , der für eine superponierte Hubverstellung anzupassen ist auf eine günstige Arbeitslage, muss der so erhaltene Vektor $\underline{d}_0(\delta_0)$ mithilfe der 2D-Drehmatrix in der Ebene gedreht werden, man erhält $\underline{d}(\delta_0 + \delta)$. Die Koordinaten nach einer Drehung seien $(d^*, -q^*)$, was in der Abbildung 8-9 dargestellt ist.

$$\bar{\underline{d}}(\delta) = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix}}_{\substack{\text{2D-Drehmatrix} \\ \text{Drehung um } \delta}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} d \\ -q \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Vektor} \\ \underline{d}_0}} \quad (8-28)$$

mit $d, q = \text{const.}$

Man erhält den Vektor \underline{y} zu:

$$\bar{\underline{y}}(t, \delta) = \bar{\underline{d}}(\delta) - \bar{\underline{e}}(t) \quad (8-29)$$

Damit lässt sich der Vektor \underline{l} ermitteln:

$$\bar{\mathbf{l}}(t, \delta) = l \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\zeta(t, \delta)) & -\sin(\zeta(t, \delta)) \\ \sin(\zeta(t, \delta)) & \cos(\zeta(t, \delta)) \end{bmatrix}}_{\substack{\text{2D-Drehmatrix} \\ \text{Drehung um } \square \zeta(t, \delta)}} \cdot \underbrace{\frac{\bar{\mathbf{y}}(t, \delta)}{|\bar{\mathbf{y}}(t, \delta)|}}_{\substack{= \text{normierter} \\ \text{y-Vektor}}} \quad (8-30)$$

mit $l = \text{const.}$

$$\text{mit } \zeta(t, \delta) = \arcsin\left(\frac{q}{|\bar{\mathbf{y}}(t, \delta)|}\right)$$

Die nicht erneut dargestellten Ortsvektoren \underline{e} , \underline{p} , \underline{s} und \underline{n} sowie der Geschwindigkeitsvektor \underline{v} des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\varphi}$, lassen sich wie bei Variante 1 ermitteln, siehe dort.

Zudem kann die Forderung nach einem konstanten Parallelversatz q aufgegeben werden. Dieser wäre dann eine Funktion $q(|z(t)|)$. Denkbar ist eine zur Pleuellängsachse schräg-lineare oder auch eine frei geformte Gleitnut im Pleuel. Die analytische Lösung ist z.B. mit folgendem Vorgehen möglich: Der Betrag von \underline{y} sei für jedes t bekannt bzw. berechenbar. Man nehme den Betrag von z und damit $q(z)$ zunächst als bekannt an, dann lässt sich über den Satz des Pythagoras $y^2 = q^2(|z|) + |z|^2$ formulieren. Für die Ermittlung von z müssen folgende Bedingungen Beachtung finden, da eventuell mehrere Lösungen erhalten werden, z.B. als Nullstellen eines Polynoms.

$$\underbrace{\bar{y}(t, \delta) \leq q(z) + z(t, \delta)}_{\text{Dreiecksungleichung}} \quad \text{und} \quad \underbrace{z(t, \delta) \geq 0}_{\substack{\text{keine} \\ \text{negativen Werte}}} \quad \text{und} \quad \underbrace{z(t, \delta) \in \Re}_{\substack{\text{keine} \\ \text{komplexen Werte}}} \quad (8-31)$$

Falls diese Beziehung nach $|z|$ aufgelöst oder numerisch gelöst werden kann, ist die Ermittlung des Winkels ζ über die arccos-Funktion möglich. Das weitere Vorgehen entspricht dem in der Gleichung (8-30).

Eine Erweiterung dessen um das Konzept aus der Variante 7 ist zusätzlich denkbar, wurde hier jedoch nicht untersucht. Dabei würde der Gleitstift C mittels eines Hilfspleuels, welches durch eine Hilfskurbel \underline{e}_1 mit fester Phasenbeziehung λ zur Hauptkurbel \underline{e} getrieben wird, in einer Nut in der Gehäusewand und / oder in der Pleuelnut geführt werden. Die jeweilige Nut könnte statt einer geraden eine freie Form aufweisen.

Für die Kurbeldrehwinkel φ und δ und die Zähnezahzahl z_1 und z_2 gilt ohne Ausschluss der Allgemeinheit:

$$\delta(t) = \frac{z_1}{z_2} \cdot \varphi(t) \quad (8-32)$$

Der hier zeitlich veränderliche Gleitstiftvektor \underline{d} , welcher vom Koordinatenursprung A zum Umlenkstift C zeigt, ergibt sich als Summe aus dem Umlenkstift-Kurbelvektor \underline{r} und dem konstanten Abstandsvektor der Kurbelachse \underline{a} unter Einbeziehung der Phase λ zu:

$$\vec{d}(t) = \begin{Bmatrix} \underline{a} \\ 0 \end{Bmatrix} + r \cdot \begin{Bmatrix} \cos[\delta(t) + \lambda] \\ \sin[\delta(t) + \lambda] \end{Bmatrix} \quad \text{mit } a, r, \lambda = \text{const.} \quad (8-33)$$

Somit lässt sich der Vektor \underline{l} unter Verwendung seines Betrags l errechnen:

$$\vec{l}(t) = l \cdot \underbrace{\frac{\vec{d}(t) - \vec{e}(t)}{|\vec{d}(t) - \vec{e}(t)|}}_{\substack{= \text{normierter Vektor} \\ \text{in Pleuelrichtung}}} \quad \text{mit } l = \text{const.} \quad (8-34)$$

Es ergibt sich der Ortsvektor \underline{p} des oberen Pleuelauges D im Koordinatensystem:

$$\vec{p}(t) = \vec{l}(t) + \vec{e}(t) \quad (8-35)$$

Der Lagevektor \underline{s} der Schubstange bildet mit einer Vertikalen durch den Punkt D und mit der Abszisse durch den Punkt E ein rechtwinkliges Dreieck und kann deshalb mit dem Satz des Pythagoras unter Verwendung der bekannten Länge l_s ermittelt werden, wobei im Folgenden $p_x(t)$ und $p_y(t)$ die zeitveränderlichen Komponenten des Pleuelvektors \underline{p} darstellen:

$$\vec{s}(t) = \begin{bmatrix} \sqrt{l_s^2 - p_y(t)^2} \\ -p_y(t) \end{bmatrix} \quad \text{mit } l_s = \text{const.} \quad (8-36)$$

Als Summe der Vektoren \underline{p} und \underline{s} ergibt sich schließlich der Vektor \underline{n} des Kolbens E im Koordinatensystem:

$$\bar{\mathbf{n}}(t) = \bar{\mathbf{s}}(t) + \bar{\mathbf{p}}(t)$$

$$\bar{\mathbf{n}}(t) = \begin{bmatrix} \sqrt{l_s^2 - p_y(t)^2} + p_x(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8-37)$$

Der nicht erneut dargestellte Ortsvektor \underline{e} sowie der Geschwindigkeitsvektor \underline{v} des Kolbens und der Winkelvektor $\underline{\varphi}$, lassen sich wie bei der Variante 1 ermitteln, siehe dort.

Die QKT-Variante 9 bietet eine gute und konstruktiv einfach zu realisierende Möglichkeit, ein Stechgerät mit sich periodisch und ständig ändernder Nadelgeschwindigkeit aufzubauen. Weitere Vorteile können sich ergeben, wenn die Drehachse der Umlenkstift-Kurbel um den Punkt A von der Abszisse weg verlagert wird. Dies kann ebenfalls konstruktiv einfach realisiert werden. Das komplexe Zusammenspiel der möglichen Änderungen wurde bisher nicht untersucht.

8.10 Detaillierte Ziel-Kriterien-Struktur zur Konzeptbewertung

Gesamtziel	Hauptziele	Zielbereiche	Kriterien
gutes Konzept, gute (technische) Lösung	1) gute Handhabung	11) geringe Komplexität bei der Handhabung: die Verwendung soll am besten „schnell mal eben“ möglich sein	11.1) überschaubare Voreinstellungen (Anzahl der Parameter, deren leicht verständliche Auswirkung, deren geringe Wechselwirkung untereinander)
			11.2) wenige und einfache Vorbereitungen zur Verwendung des Konzepts bei der Anwendung (Vertrautheit, Anzahl, Dauer)
			11.3) einfacher Einsatz bei der Anwendung (möglichst keine zusätzliche „freie Hand“ binden o.ä.)
			11.4) wenige und einfache Nachbereitungen durch die (zusätzliche) Anwendung (Vertrautheit, Anzahl, Dauer)
		12) günstige physikalische Eigenschaften des Konzept	12.1) klein (wenn nötig)
			12.2) leicht (wenn nötig)
			12.3) günstige Schwerpunktlage
			12.4) Nutzung üblicherweise vorhandener Energiequellen
			12.5) Gerät/ Aufbau/ Konstruktion benötigt für die Funktion keine zusätzlichen Zuleitungen (Energie, Daten)
	13) Belastungen für den Anwender oder Kunden bei der Verwendung des Konzepts	13.1) geringe Geräusentwicklung	
		13.2) geringe Vibrationsempfindung	
		13.3) geringe Temperaturerhöhung (Gehäuseteile, exotherme chemische Reaktion)	
	2) geringes, vom Konzept ausgehendes Risiko	21) für die anwendende Person	21.1) geringe Kontaminationsgefahr (kein Spritzen von Flüssigkeit, leichte „äußere“ Reinigung, wenig Kontakt mit Körperflüssigkeiten, einfache Entsorgung des Verbrauchsmaterials)
			21.2) geringe Verletzungsgefahr (Strom, Abrieb, Wärme, Bersten, unkontrolliertes Ansaugen, Umgang mit giftigen Stoffen), auch durch das Verbrauchsmaterial (betriebssichere Ruhelage spitzer Teile)
		22) für die behandelte Person	22.1) geringe Kontaminationsgefahr (leichte „innere“ Reinigung, Einwegmaterial, keine Übertragungswege vom Vorbehandelten)
			22.2) geringe Verletzungsgefahr (Verschleppung von Fremdkörpern, Eintrag von Abrieb, umständliches Entfernen des Konzepts)
		23) geringes Versagensrisiko	23.1) lässt sich drohendes Versagen gut erkennen (Lautstärke, Geräusch, Vibration, Färbung bei Flüssigkeiten)
23.2) seltenes Versagen (zuverlässiges, robustes Konzept)			
23.3) lässt sich drohendes Versagen frühzeitig erkennen und kann daher noch einige Zeit weitergearbeitet werden (Zeit für Ersatzbeschaffung und Planung)			

Tabelle 8-1 Ziele und Kriterien für die Bewertung der Konzepte, Teil 1

Gesamtziel	Hauptziele	Zielbereiche	Kriterien
gutes Konzept, gute (technische) Lösung	3) gute Wirkungsweise	31) der Haupteinflusseffekt des Geräts / der Konstruktion ist gut einstellbar / das ~ ist gut kontrollierbar bzgl. seiner Wirkstärke (bspw. die Stechtiefe, die Stärke der Versteifung)	31.1) leicht, einfach einstellbar
			31.2) unabhängig von anderen Parametern einstellbar
			31.3) auch im laufenden Betrieb einstellbar
			31.4) auf großem Intervall einstellbar (Wertebereich)
			31.5) genau einstellbar (möglichst große Genauigkeit und Auflösung bei der Einstellung des Haupteffekts)
		32) große Unabhängigkeit des Haupteinflusseffekts von der Handhabung	32.1) vorteilhafte Wirkung unabhängig von der Handhaltung (Winkel, Abstand)
			32.2) vorteilhafte Wirkung unabhängig von der Bewegungsrichtung
			32.3) vorteilhafte Wirkung unabhängig von zusätzlichen Maßnahmen (Hautspannung)
		33) Gewährleistung einer uneingeschränkten Anwendung (möglichst keine Beschränkungen durch die Geräteausführung)	33.1) gezieltes Arbeiten (Einsehbarkeit, Beobachtung des Ergebnisses o.ä.)
			33.2) unabhängig vom Zustand des Subjekts („kann bei jedem angewendet werden“)
			33.3) unabhängig von der Lage des Subjekts (keine besondere Positionierung o.ä.)
			33.4) ohne Begrenzungen bzgl. der Behandlungsfläche (kein begrenzter Bereich je Behandlung)
			33.5) Anwendung unabhängig von den Umgebungsverhältnissen (Licht, Geräusch, Feuchtigkeit, Luftbewegung...)
			33.6) unabhängig von der Lokalisation am Subjekt („kann überall am Körper angewendet werden“)
		34) günstige Nebeneffekte bei der Anwendung des Konzepts	34.1) Vermeidung oder Verminderung von Misserpfindungen bei der unterstützten Anwendung
			34.2) übliche Anwendungsdauer kann durch Konzept verkürzt werden (bessere Wirkung, höhere Effektivität durch schnelleren Erfolg)
			34.3) Risiken der sonst üblichen Anwendung werden verringert (Misserfolg der Behandlung und Bedarf an Nachbehandlung sinkt, z.B. durch verbesserten Wirkstoff- oder Farbeintrag...)

Tabelle 8-2 Ziele und Kriterien für die Bewertung der Konzepte, Teil 2

Gesamtziel	Hauptziele	Zielbereiche	Kriterien
gutes Konzept, gute (technische) Lösung	4) gute Möglichkeit zur Umsetzung als Produkt (oder als Versuchsanlage, als Teststand...)	41) geringer Entwicklungs- und Zulassungsaufwand	41.1) bezüglich der Verbrauchsmittel oder Hilfsmittel (bspw. besondere Materialien und Zulassungen wegen der Gefahr der Fremdkörperverschleppung)
			41.2) ... um die Lebensdauer zu verbessern
			41.3) ... für notwendige Tests mit Prototypen (Labormuster, Praxistests, Dauerfestigkeit)
		42) einfache Fertigung oder Herstellung	42.1) Fertigung möglichst unabhängig von notwendigen Kernkompetenzen
			42.2) günstiges Herstellungsverfahren (möglichst unbeschränkt bzgl. des ~), möglichst große Auswahl und Toleranzen
			42.3) wenige zu fertigende Bauteile (preiswerte Zukaufteile)
			42.4) wenige Bearbeitungsschritte bei der Fertigung der Bauteile (Umspannen, Mehrseitenbearbeitung, Anzahl, Spanvolumen)
			42.5) wenige Nachbehandlungen notwendig (Härten, Polieren, Beschichten, Entgraten, Reiben u.a.m.)
		43) einfache Montage	43.1) wenige Montageschritte
			43.2) einfache Montageschritte
			43.3) möglichst geringe Wartezeiten
		44) wenig aufwendige Materialbeschaffung und -lagerung	44.1) möglichst kostengünstiges Material oder nur geringste Mengen kostenintensiver Bauteile
			44.2) gute Materialverfügbarkeit (keine Beschaffungsprobleme zeitlich, räumlich)
			44.3) geringe Ansprüche an die Qualität des Ausgangsmaterials (ist bspw. eine strenge Eingangsprüfung vorzusehen, Haltbarkeit, Lagerbedingungen, Alterung, Materialverzug, Korrosion, Halbzeugmaße, Lunker, Gießfehler usw.)
		45) freies Design	45.1) freie äußere Form (geringe Formvorgaben durch inneren Aufbau des Konzepts)
			45.2) freie Materialwahl für äußere Gestaltung (geringe Forderungen bzgl. der Steifigkeit, Wärmeabgabe...)
			45.3) freie Größe
		46) gutes Verbrauchsmaterial	46.1) platzsparend bzgl. Lagerhaltung und Versand beim Hersteller, Vertrieb, Kunden
			46.2) ökologisch herstell- und entsorgbar
			46.3) hohe garantierte Verfügbarkeit
			46.4) wenig Zubehör essentiell notwendig
		47) gutes Marketing möglich („gute Werbung für die Sache“ ist möglich, gute Marktposition, gute Argumentationsbasis)	47.1) Neuheit des Verfahrens am Markt (Methode bisher unbekannt)
			47.2) überzeugende Effektivität des Verfahrens
			47.3) lassen sich tatsächlich vorhandene hochwertige Bauteile besonders vorteilhaft hervorheben (Material, Herstellung, Präzision, Langlebigkeit, Prüfverfahren, „Made in Germany“)
			47.4) wahrscheinlich geplante Anmeldung von Schutzrechten soll ein Alleinstellungsmerkmal garantieren
		48) möglichst hohes Gewinnpotenzial	48.1) ... durch hohen Produktpreis am Markt
			48.2) ... durch hohe Verkaufszahlen
			48.3) ... durch niedrige Produktkosten
48.4) ... durch verbesserte Vertriebsstruktur (preiswerter Versand, kurze Wege bei weltweiter Produktion, Befreiung von bisherigen Vertriebswegen, neue Verträge, neue Partner, neue Marke oder neues Label kreieren)			
48.5) ... durch günstigen Service (wenige Reparaturen, gute Zerlegbarkeit, Justage, wenig Schulungsbedarf, Vor-Ort-Service)			

Tabelle 8-3 Ziele und Kriterien für die Bewertung der Konzepte, Teil 3

8.11 Paarvergleichsmatrix für die Hauptziele

Bewertungsbandbreite = 10		Gewichtungsbandbreite = 10					
	g1	g2	g3	g4	ZWS	relativ	Gewicht
g1	0,00	3,44	2,93	6,80	13,172	21,95%	2,2
g2	6,56	0,00	6,49	6,08	19,128	31,88%	3,2
g3	7,07	3,51	0,00	6,65	17,232	28,72%	2,9
g4	3,20	3,92	3,35	0,00	10,468	17,45%	1,7
Gesamtsumme:					60	100,00%	10,0

g1	g2	Zahl:
g1	g3	656174
g1	g4	707021
g2	g3	319612
g2	g4	351089
g3	g4	392251
g3	g4	334951

Abb. 8-11 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Hauptziele bei der Bewertung der entwickelten Konzepte

8.12 Paarvergleichsmatrizen für die Zielbereiche 1x bis 4x

Bewertungsbandbreite = 10		Gewichtungsbandbreite = 10				
	g11	g12	g13	ZWS	relativ	Gewicht
g11	0,00	9,81	4,14	13,95	46,5%	4,7
g12	0,19	0,00	2,54	2,73	9,1%	0,9
g13	5,86	7,46	0,00	13,32	44,4%	4,4
Gesamtsumme:				30	100,0%	10,0

g11	g12	Zahl:
g11	g13	18644
g12	g13	585956
g12	g13	745762

Abb. 8-12 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für den Zielbereich 1x des Hauptziels 1

Bewertungsbandbreite = 10		Gewichtungsbandbreite = 10				
	g21	g22	g23	ZWS	relativ	Gewicht
g21	0,00	3,30	7,16	10,46	34,9%	3,5
g22	6,70	0,00	8,13	14,83	49,4%	4,9
g23	2,84	1,87	0,00	4,71	15,7%	1,6
Gesamtsumme:				30	100,0%	10,0

g21	g22	Zahl:
g21	g23	669902
g22	g23	283980
g22	g23	186893

Abb. 8-13 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für den Zielbereich 2x des Hauptziels 2

	Bewertungsbandbreite = 10				Gewichtungsbandbreite = 10		
	g31	g32	g33	g34	ZWS	relativ	Gewicht
g31	0,00	4,05	3,13	4,88	12,06	20,1%	2,0
g32	5,95	0,00	2,33	5,90	14,17	23,6%	2,4
g33	6,87	7,67	0,00	7,18	21,72	36,2%	3,6
g34	5,12	4,10	2,82	0,00	12,04	20,1%	2,0
Gesamtsumme:					60	100,0%	10,0

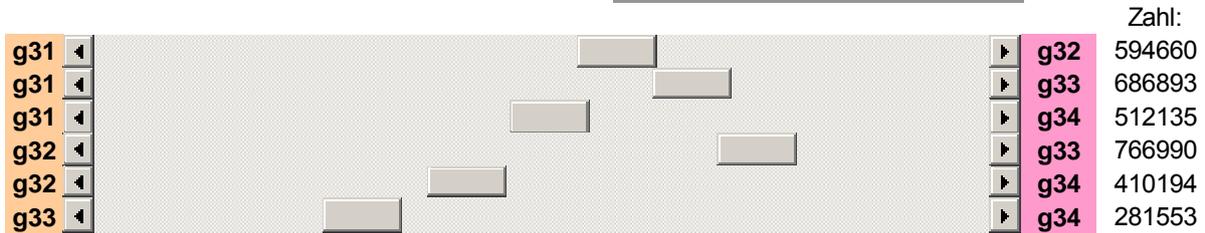


Abb. 8-14 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für den Zielbereich 3x des Hauptziels 3

	Bewertungsbandbreite = 10								Gewichtungsbandbreite = 10		
	g41	g42	g43	g44	g45	g46	g47	g48	ZWS	relativ	Gewicht
g41	0,00	0,71	0,46	0,64	7,51	1,19	2,01	0,15	12,67	4,53%	0,5
g42	9,29	0,00	5,50	7,26	9,16	2,23	1,57	1,10	36,11	12,90%	1,3
g43	9,54	4,50	0,00	8,41	7,70	2,91	2,56	0,55	36,18	12,92%	1,3
g44	9,36	2,74	1,59	0,00	3,75	1,92	0,88	0,24	20,49	7,32%	0,7
g45	2,49	0,84	2,30	6,25	0,00	6,16	0,79	0,97	19,80	7,07%	0,7
g46	8,81	7,77	7,09	8,08	3,84	0,00	4,06	3,11	42,76	15,27%	1,5
g47	7,99	8,43	7,44	9,12	9,21	5,94	0,00	5,70	53,82	19,22%	1,9
g48	9,85	8,90	9,45	9,76	9,03	6,89	4,30	0,00	58,17	20,77%	2,1
Gesamtsumme:									280	100,00%	10,0

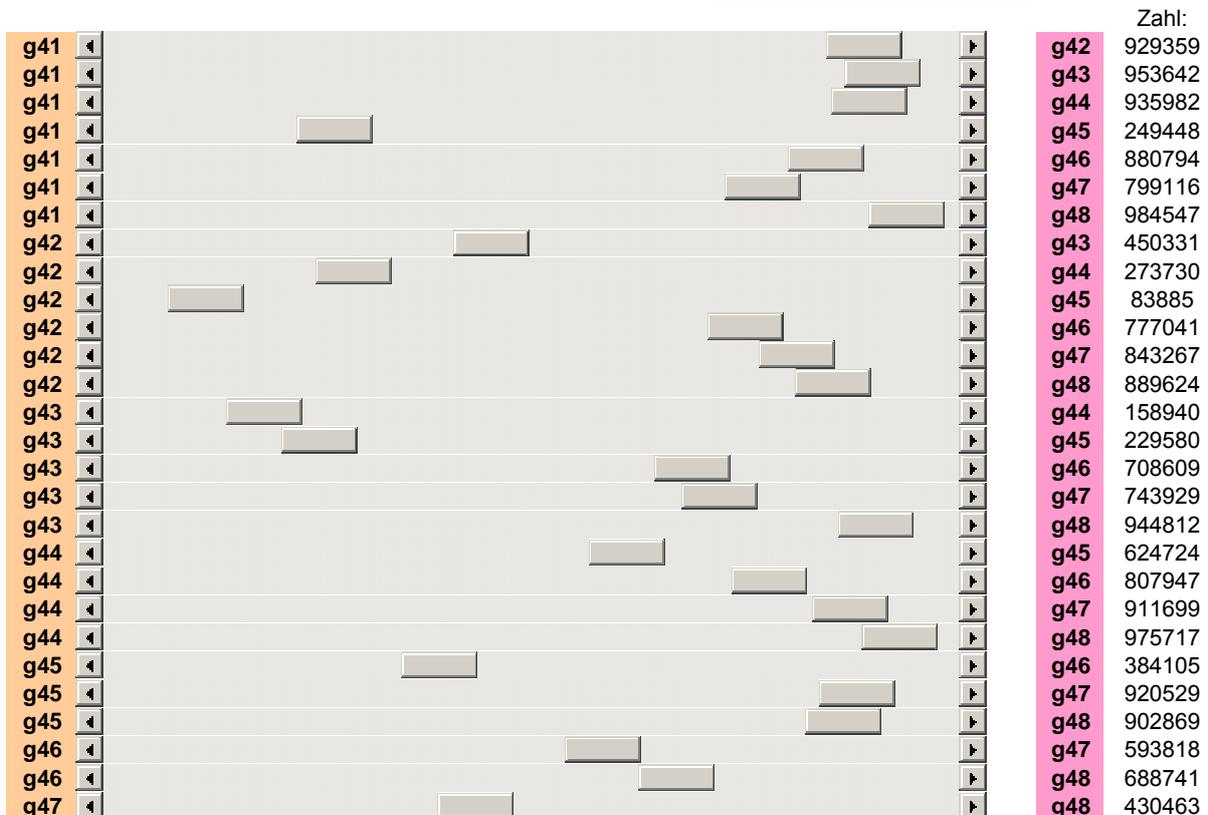


Abb. 8-15 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für den Zielbereich 4x des Hauptziels 4

8.13 Paarvergleichsmatrizen für die Kriterien 11.x bis 48.x

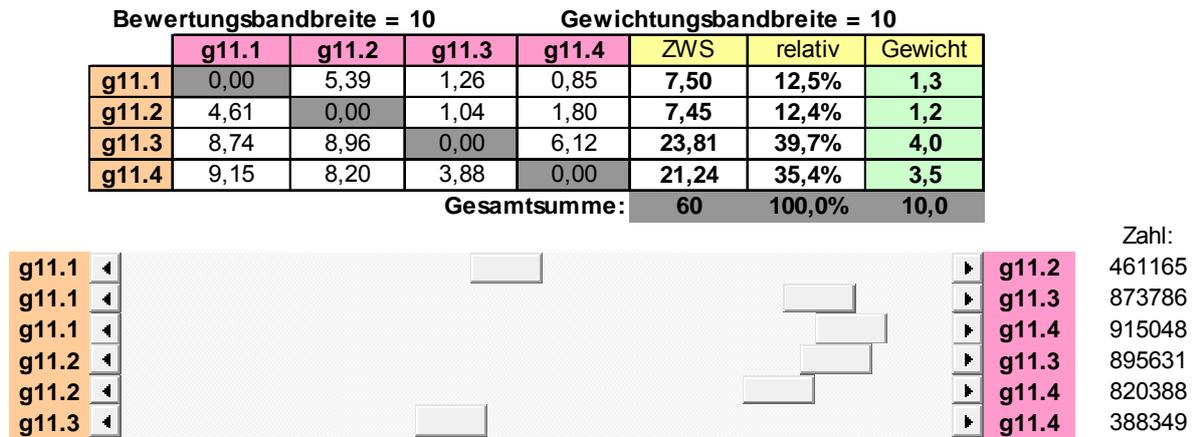


Abb. 8-16 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 11.x

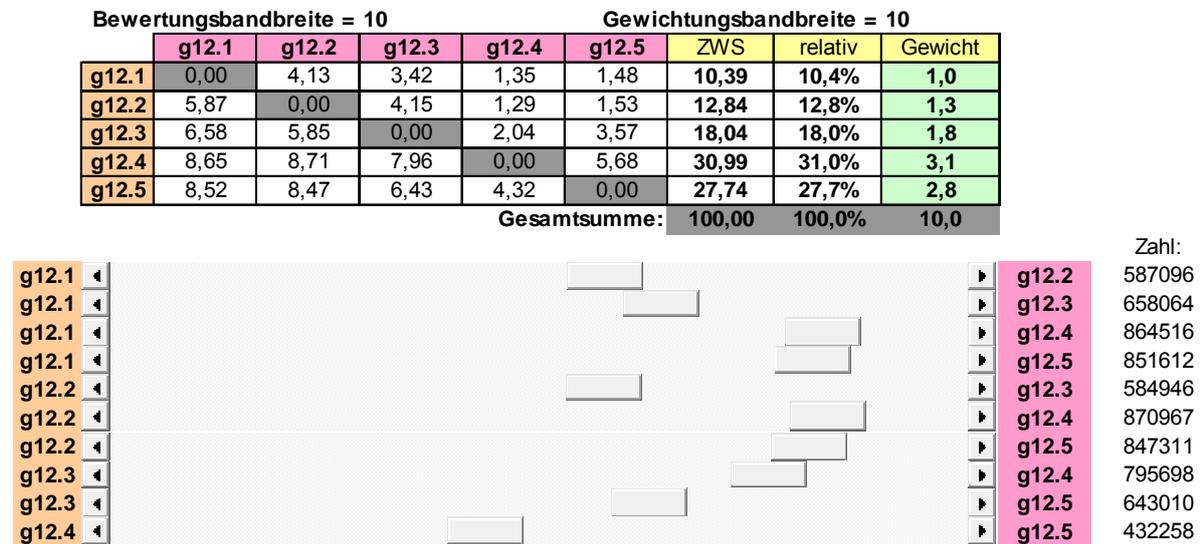


Abb. 8-17 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 12.x

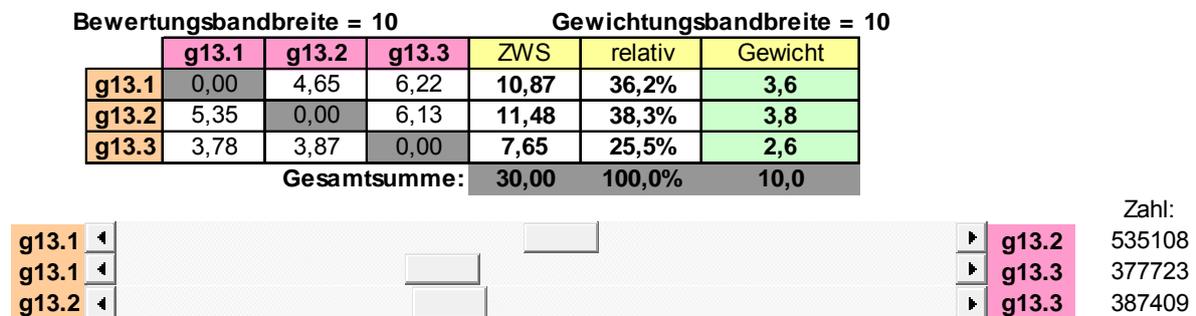


Abb. 8-18 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 13.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g21.1	g21.2	ZWS	relativ	Gewicht
g21.1	0,00	6,30	6,30	63,0%	6,3
g21.2	3,70	0,00	3,70	37,0%	3,7
Gesamtsumme:			10,00	100,0%	10,0

g21.1					g21.2
-------	--	--	--	--	-------

Zahl:
370262

Abb. 8-19 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 21.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g22.1	g22.2	ZWS	relativ	Gewicht
g22.1	0,00	5,00	5,00	50,0%	5,0
g22.2	5,00	0,00	5,00	50,0%	5,0
Gesamtsumme:			10,00	100,0%	10,0

g22.1					g22.2
-------	--	--	--	--	-------

Zahl:
500000

Abb. 8-20 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 22.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g23.1	g23.2	g23.3	ZWS	relativ	Gewicht
g23.1	0,00	1,28	1,02	2,30	7,7%	0,8
g23.2	8,72	0,00	8,43	17,15	57,2%	5,7
g23.3	8,98	1,57	0,00	10,55	35,2%	3,5
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0

g23.1					g23.2
g23.1					g23.3
g23.2					g23.3

Zahl:
871670
898305
156695

Abb. 8-21 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 23.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g31.1	g31.2	g31.3	g31.4	g31.5	ZWS	relativ	Gewicht
g31.1	0,00	3,42	0,58	2,11	0,99	7,10	7,1%	0,7
g31.2	6,58	0,00	4,60	6,04	1,85	19,08	19,1%	1,9
g31.3	9,42	5,40	0,00	6,69	4,90	26,41	26,4%	2,6
g31.4	7,89	3,96	3,31	0,00	4,34	19,51	19,5%	2,0
g31.5	9,01	8,15	5,10	5,66	0,00	27,91	27,9%	2,8
Gesamtsumme:						100,00	100,0%	10,0

g31.1						g31.2
g31.1						g31.3
g31.1						g31.4
g31.1						g31.5
g31.2						g31.3
g31.2						g31.4
g31.2						g31.5
g31.3						g31.4
g31.3						g31.5
g31.4						g31.5

Zahl:
658064
941935
789247
901075
539784
395698
815053
331182
509677
565591

Abb. 8-22 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 31.x

		Bewertungsbandbreite = 10			Gewichtungsbandbreite = 10		
	g32.1	g32.2	g32.3	ZWS	relativ	Gewicht	
g32.1	0,00	6,42	6,17	12,59	42,0%	4,2	
g32.2	3,58	0,00	6,54	10,12	33,7%	3,4	
g32.3	3,83	3,46	0,00	7,29	24,3%	2,4	
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0	

g32.1	g32.2	Zahl:
g32.1	g32.3	358353
g32.2	g32.3	382566
	g32.3	346246

Abb. 8-23 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 32.x

		Bewertungsbandbreite = 10					Gewichtungsbandbreite = 10			
	g33.1	g33.2	g33.3	g33.4	g33.5	g33.6	ZWS	relativ	Gewicht	
g33.1	0,00	6,51	6,77	6,93	7,16	6,07	33,44	22,29%	2,2	
g33.2	3,49	0,00	7,82	8,70	8,02	7,91	35,94	23,96%	2,4	
g33.3	3,23	2,18	0,00	3,26	3,45	1,90	14,02	9,35%	0,9	
g33.4	3,07	1,30	6,74	0,00	3,31	1,63	16,05	10,70%	1,1	
g33.5	2,84	1,98	6,55	6,69	0,00	5,89	23,96	15,97%	1,6	
g33.6	3,93	2,09	8,10	8,37	4,11	0,00	26,60	17,73%	1,8	
Gesamtsumme:							150	100,00%	10,0	

g33.1	g33.2	Zahl:
g33.1	g33.3	349122
g33.1	g33.4	322807
g33.1	g33.5	307017
g33.1	g33.6	284210
g33.2	g33.3	392982
g33.2	g33.4	217543
g33.2	g33.5	130165
g33.2	g33.6	198245
g33.3	g33.4	208677
g33.3	g33.5	673553
g33.3	g33.6	654958
g33.4	g33.6	809917
g33.5	g33.6	669421
g33.6	g33.6	836776
g33.6	g33.6	411157

Abb. 8-24 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 33.x

		Bewertungsbandbreite = 10			Gewichtungsbandbreite = 10		
	g34.1	g34.2	g34.3	ZWS	relativ	Gewicht	
g34.1	0,00	8,72	0,82	9,54	31,8%	3,2	
g34.2	1,28	0,00	0,31	1,60	5,3%	0,5	
g34.3	9,18	9,69	0,00	18,86	62,9%	6,3	
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0	

g34.1	g34.2	Zahl:
g34.1	g34.3	128329
g34.2	g34.3	917675
	g34.3	968523

Abb. 8-25 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 34.x

Bewertungsbandbreite = 10		Gewichtungsbandbreite = 10				
	g41.1	g41.2	g41.3	ZWS	relativ	Gewicht
g41.1	0,00	2,13	7,22	9,35	31,2%	3,1
g41.2	7,87	0,00	7,77	15,64	52,1%	5,2
g41.3	2,78	2,23	0,00	5,01	16,7%	1,7
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0

g41.1	g41.2	Zahl:	786924
g41.1	g41.3	Zahl:	278450
g41.2	g41.3	Zahl:	222760

Abb. 8-26 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 41.x

Bewertungsbandbreite = 10		Gewichtungsbandbreite = 10						
	g42.1	g42.2	g42.3	g42.4	g42.5	ZWS	relativ	Gewicht
g42.1	0,00	6,77	3,74	2,10	1,64	14,24	14,2%	1,4
g42.2	3,23	0,00	5,25	6,24	2,35	17,07	17,1%	1,7
g42.3	6,26	4,75	0,00	6,72	2,12	19,85	19,8%	2,0
g42.4	7,90	3,76	3,28	0,00	1,57	16,52	16,5%	1,7
g42.5	8,36	7,65	7,88	8,43	0,00	32,32	32,3%	3,2
Gesamtsumme:						100,00	100,0%	10,0

g42.1	g42.2	Zahl:	323232
g42.1	g42.3	Zahl:	626262
g42.1	g42.4	Zahl:	790404
g42.1	g42.5	Zahl:	835858
g42.2	g42.3	Zahl:	474747
g42.2	g42.4	Zahl:	376262
g42.2	g42.5	Zahl:	765151
g42.3	g42.4	Zahl:	328282
g42.3	g42.5	Zahl:	787878
g42.4	g42.5	Zahl:	843434

Abb. 8-27 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 42.x

Bewertungsbandbreite = 10		Gewichtungsbandbreite = 10				
	g43.1	g43.2	g43.3	ZWS	relativ	Gewicht
g43.1	0,00	5,42	2,32	7,75	25,8%	2,6
g43.2	4,58	0,00	1,79	6,37	21,2%	2,1
g43.3	7,68	8,21	0,00	15,88	52,9%	5,3
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0

g43.1	g43.2	Zahl:	457627
g43.1	g43.3	Zahl:	767554
g43.2	g43.3	Zahl:	820823

Abb. 8-28 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Zielkriterien 43.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g44.1	g44.2	g44.3	ZWS	relativ	Gewicht
g44.1	0,00	5,81	4,09	9,90	33,0%	3,3
g44.2	4,19	0,00	4,07	8,26	27,5%	2,8
g44.3	5,91	5,93	0,00	11,84	39,5%	3,9
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0

g44.1	◀						▶	g44.2	Zahl:	418886
g44.1	◀						▶	g44.3		590799
g44.2	◀						▶	g44.3		593220

Abb. 8-29 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 44.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g45.1	g45.2	g45.3	ZWS	relativ	Gewicht
g45.1	0,00	6,13	3,56	9,69	32,3%	3,2
g45.2	3,87	0,00	3,37	7,24	24,1%	2,4
g45.3	6,44	6,63	0,00	13,08	43,6%	4,4
Gesamtsumme:				30,00	100,0%	10,0

g45.1	◀						▶	g45.2	Zahl:	387409
g45.1	◀						▶	g45.3		644067
g45.2	◀						▶	g45.3		663438

Abb. 8-30 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 45.x

Bewertungsbandbreite = 10 Gewichtungsbandsbreite = 10

	g46.1	g46.2	g46.3	g46.4	ZWS	relativ	Gewicht
g46.1	0,00	3,50	1,26	5,64	10,40	17,3%	1,7
g46.2	6,50	0,00	2,21	5,19	13,90	23,2%	2,3
g46.3	8,74	7,79	0,00	5,42	21,95	36,6%	3,7
g46.4	4,36	4,81	4,58	0,00	13,75	22,9%	2,3
Gesamtsumme:					60	100,0%	10,0

g46.1	◀							▶	g46.2	Zahl:	650429
g46.1	◀							▶	g46.3		873925
g46.1	◀							▶	g46.4		435530
g46.2	◀							▶	g46.3		779369
g46.2	◀							▶	g46.4		481375
g46.3	◀							▶	g46.4		458452

Abb. 8-31 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 46.x

	Bewertungsbandbreite = 10				Gewichtungsbandbreite = 10		
	g47.1	g47.2	g47.3	g47.4	ZWS	relativ	Gewicht
g47.1	0,00	2,58	4,90	1,86	9,34	15,6%	1,6
g47.2	7,42	0,00	5,67	3,35	16,45	27,4%	2,7
g47.3	5,10	4,33	0,00	1,72	11,15	18,6%	1,9
g47.4	8,14	6,65	8,28	0,00	23,07	38,4%	3,8
Gesamtsumme:					60	100,0%	10,0

	Zahl:
g47.1	742120
g47.1	510028
g47.1	813753
g47.2	432664
g47.2	664756
g47.3	828080

Abb. 8-32 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 47.x

	Bewertungsbandbreite = 10				Gewichtungsbandbreite = 10			
	g48.1	g48.2	g48.3	g48.4	g48.5	ZWS	relativ	Gewicht
g48.1	0,00	3,28	2,02	3,96	1,16	10,43	10,4%	1,0
g48.2	6,72	0,00	2,90	6,41	2,02	18,06	18,1%	1,8
g48.3	7,98	7,10	0,00	6,67	3,76	25,51	25,5%	2,6
g48.4	6,04	3,59	3,33	0,00	1,39	14,34	14,3%	1,4
g48.5	8,84	7,98	6,24	8,61	0,00	31,67	31,7%	3,2
Gesamtsumme:						100,00	100,0%	10,0

	Zahl:
g48.1	671717
g48.1	797979
g48.1	603535
g48.1	883838
g48.2	709595
g48.2	358585
g48.2	797979
g48.3	333333
g48.3	623737
g48.4	861111

Abb. 8-33 Paarvergleichsmatrix zur Ermittlung der Gewichte für die Kriterien 48.x

8.14 Detaillierte Ergebnisse der Konzeptbewertung

Krit.-Nr.	Gewicht	A_01		A_02		A_03		A_04		A_05	
		KT mit Innenlager	Stabkurbeltrieb	QKT-Prototyp Var. 2	QKT-Redesign Var. 5	Sprungfaktor	Note	Wert	Note	Wert	
11.1	12,76	5,3	67,6	5,2	66,4	3,7	47,2	4,5	57,4	5,6	71,5
11.2	12,68	5,5	69,7	5,3	67,2	5,1	64,7	5,1	64,7	5,5	69,7
11.3	40,52	6,0	243,1	6,0	243,1	6,0	243,1	6,0	243,1	6,0	243,1
11.4	36,14	6,0	216,9	6,0	216,9	6,0	216,9	6,0	216,9	6,0	216,9
Zwischensumme:			597,4		593,6		571,9		582,1		601,2
12.1	2,07	4,9	10,2	5,2	10,8	3,8	7,9	4,5	9,3	5,0	10,4
12.2	2,56	4,7	12,0	5,2	13,3	3,9	10,0	3,9	10,0	4,1	10,5
12.3	3,60	4,8	17,3	5,3	19,1	3,5	12,6	3,5	12,6	4,9	17,7
12.4	6,19	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1
12.5	5,54	6,0	33,2	6,0	33,2	6,0	33,2	6,0	33,2	6,0	33,2
Zwischensumme:			109,9		113,6		100,9		102,3		108,9
13.1	35,32	5,2	183,6	4,9	173,0	1,5	53,0	2,1	74,2	2,3	81,2
13.2	37,28	5,4	201,3	5,6	208,8	4,9	182,7	5,2	193,9	3,7	137,9
13.3	24,85	5,6	139,2	5,1	126,8	4,5	111,8	4,9	121,8	4,3	106,9
Zwischensumme:			524,1		508,6		347,5		389,8		326,0
Hauptziel 1 Total:			1.231,4		1.215,7		1.020,3		1.074,2		1.036,2
21.1	70,01	5,8	406,0	5,8	406,0	2,8	196,0	2,8	196,0	2,1	147,0
21.2	41,16	6,0	247,0	6,0	247,0	4,2	172,9	6,0	247,0	2,8	115,3
Zwischensumme:			653,0		653,0		368,9		443,0		262,3
22.1	78,80	6,0	472,8	6,0	472,8	6,0	472,8	6,0	472,8	6,0	472,8
22.2	78,80	6,0	472,8	6,0	472,8	4,2	331,0	4,2	331,0	4,0	315,2
Zwischensumme:			945,6		945,6		803,7		803,7		788,0
23.1	3,84	3,8	14,6	3,0	11,5	5,3	20,3	5,5	21,1	1,5	5,8
23.2	28,61	5,2	148,7	4,8	137,3	1,3	37,2	2,8	80,1	4,3	123,0
23.3	17,60	5,3	93,3	3,6	63,3	1,0	17,6	4,5	79,2	1,4	24,6
Zwischensumme:			256,6		212,2		75,1		180,4		153,4
Hauptziel 2 Total:			1.855,2		1.810,8		1.247,8		1.427,1		1.203,6
31.1	4,10	1,0	4,1	5,8	23,8	3,2	13,1	5,1	20,9	1,0	4,1
31.2	11,01	2,7	29,7	2,7	29,7	1,5	16,5	1,9	20,9	6,0	66,1
31.3	15,25	0,0	0,0	6,0	91,5	6,0	91,5	6,0	91,5	0,0	0,0
31.4	11,26	6,0	67,6	6,0	67,6	6,0	67,6	6,0	67,6	4,6	51,8
31.5	16,12	6,0	96,7	4,7	75,8	4,3	69,3	4,8	77,4	6,0	96,7
Zwischensumme:			198,1		288,3		258,0		278,3		218,7
32.1	28,48	3,0	85,4	3,0	85,4	5,0	142,4	4,5	128,1	5,8	165,2
32.2	22,89	6,0	137,3	6,0	137,3	6,0	137,3	6,0	137,3	6,0	137,3
32.3	16,48	4,5	74,2	4,5	74,2	5,2	85,7	4,9	80,8	5,7	94,0
Zwischensumme:			296,9		296,9		365,4		346,2		396,4
33.1	23,18	6,0	139,1	6,0	139,1	6,0	139,1	6,0	139,1	6,0	139,1
33.2	24,92	3,5	87,2	3,7	92,2	4,4	109,6	4,2	104,7	5,5	137,0
33.3	9,72	6,0	58,3	6,0	58,3	6,0	58,3	6,0	58,3	6,0	58,3
33.4	11,12	6,0	66,7	6,0	66,7	6,0	66,7	6,0	66,7	6,0	66,7
33.5	16,61	6,0	99,6	6,0	99,6	6,0	99,6	6,0	99,6	6,0	99,6
33.6	18,44	6,0	110,6	6,0	110,6	6,0	110,6	6,0	110,6	6,0	110,6
Zwischensumme:			561,6		566,6		584,0		579,0		611,4
34.1	18,32	3,5	64,1	3,5	64,1	3,0	55,0	3,1	56,8	4,8	88,0
34.2	3,07	3,8	11,7	3,8	11,7	5,0	15,3	4,7	14,4	5,7	17,5
34.3	36,23	3,5	126,8	3,5	126,8	4,3	155,8	4,4	159,4	5,6	202,9
Zwischensumme:			202,6		202,6		226,1		230,6		308,3
Hauptziel 3 Total:			1.259,2		1.354,4		1.433,6		1.434,2		1.534,9
41.1	2,46	6,0	14,8	6,0	14,8	6,0	14,8	6,0	14,8	6,0	14,8
41.2	4,12	4,8	19,8	2,6	10,7	1,3	5,4	1,3	5,4	1,8	7,4
41.3	1,32	4,8	6,3	2,3	3,0	1,5	2,0	1,8	2,4	1,8	2,4
Zwischensumme:			40,8		28,5		22,1		22,5		24,5
42.1	3,21	6,0	19,2	3,9	12,5	2,2	7,1	2,5	8,0	4,5	14,4
42.2	3,84	5,0	19,2	4,7	18,1	1,8	6,9	1,8	6,9	4,6	17,7
42.3	4,47	5,8	25,9	4,6	20,5	2,0	8,9	3,5	15,6	4,9	21,9
42.4	3,72	6,0	22,3	5,2	19,3	2,1	7,8	2,2	8,2	3,3	12,3
42.5	7,27	6,0	43,6	5,2	37,8	2,0	14,5	2,0	14,5	3,9	28,4
Zwischensumme:			130,3		108,2		45,3		53,3		94,6
43.1	5,82	5,8	33,8	5,5	32,0	3,4	19,8	4,2	24,5	4,5	26,2
43.2	4,79	5,3	25,4	5,3	25,4	4,7	22,5	4,7	22,5	4,3	20,6
43.3	11,94	6,0	71,6	6,0	71,6	6,0	71,6	6,0	71,6	6,0	71,6
Zwischensumme:			130,8		129,0		113,9		118,6		118,4
44.1	4,21	6,0	25,3	5,2	21,9	4,4	18,5	4,4	18,5	5,5	23,2
44.2	3,51	6,0	21,1	6,0	21,1	5,5	19,3	5,5	19,3	6,0	21,1
44.3	5,04	6,0	30,2	4,5	22,7	4,1	20,7	4,1	20,7	6,0	30,2
Zwischensumme:			76,6		65,7		58,5		58,5		74,5
45.1	3,98	4,9	19,5	4,5	17,9	2,1	8,4	3,8	15,1	5,0	19,9
45.2	2,98	6,0	17,9	6,0	17,9	4,4	13,1	4,8	14,3	4,8	14,3
45.3	5,38	5,0	26,9	5,0	26,9	4,0	21,5	4,6	24,7	3,8	20,4
Zwischensumme:			64,3		62,7		43,0		54,2		54,6
46.1	4,62	5,0	23,1	5,0	23,1	5,0	23,1	5,0	23,1	5,0	23,1
46.2	6,17	3,0	18,5	3,0	18,5	3,0	18,5	3,0	18,5	3,0	18,5
46.3	9,75	4,2	40,9	4,2	40,9	4,2	40,9	4,2	40,9	4,2	40,9
46.4	6,11	3,0	18,3	3,0	18,3	3,0	18,3	3,0	18,3	3,0	18,3
Zwischensumme:			100,9		100,9		100,9		100,9		100,9
47.1	5,22	3,0	15,7	3,7	19,3	6,0	31,3	6,0	31,3	6,0	31,3
47.2	9,19	4,5	41,4	5,0	46,0	5,7	52,4	5,8	53,3	6,0	55,2
47.3	6,23	4,3	26,8	5,3	33,0	5,5	34,3	5,5	34,3	4,0	24,9
47.4	12,89	3,0	38,7	4,5	58,0	4,5	58,0	4,5	58,0	2,0	25,8
Zwischensumme:			122,5		156,3		176,0		176,9		137,2
48.1	3,78	4,7	17,8	6,0	22,7	3,0	11,3	5,2	19,7	5,5	20,8
48.2	6,54	4,0	26,2	5,0	32,7	2,3	15,1	3,0	19,6	2,8	18,3
48.3	9,24	6,0	55,5	5,4	49,9	2,4	22,2	2,7	25,0	4,6	42,5
48.4	5,20	4,5	23,4	6,0	31,2	3,5	18,2	4,0	20,8	6,0	31,2
48.5	11,48	5,7	65,4	5,3	60,8	4,3	49,4	4,7	53,9	5,2	59,7
Zwischensumme:			188,2		197,3		116,1		139,0		172,5
Hauptziel 4 Total:			854,3		848,6		675,7		723,8		777,2
Gesamtsumme:			5.276,8		5.295,2		4.435,8		4.717,8		4.626,4

Tabelle 8-4 Bewertung der Konzepte, Teil 1 (Alternative A_01 bis A_05)

Krit.-Nr.	Gewicht	A_06		A_07		A_08		A_09		A_10	
		Schlagfaktor		Versteifungsschicht		Stechtiefenbegrenzung		Kammstechverfahren		Vakuummödul	
		Note	Wert	Note	Wert	Note	Wert	Note	Wert	Note	Wert
11.1	12,76	5,3	67,6	3,5	44,7	6,0	76,6	5,3	67,6	2,5	31,9
11.2	12,68	5,5	69,7	2,1	26,6	5,7	72,3	5,7	72,3	5,5	69,7
11.3	40,52	6,0	243,1	6,0	243,1	6,0	243,1	6,0	243,1	5,5	221,3
11.4	36,14	6,0	216,9	1,5	54,2	6,0	216,9	6,0	216,9	6,0	216,9
Zwischensumme:			597,4		368,7		608,9		599,9		539,8
12.1	2,07	4,5	9,3	6,0	12,4	6,0	12,4	5,2	10,8	5,3	11,0
12.2	2,56	3,5	9,0	6,0	15,4	5,8	14,9	4,1	10,5	4,5	11,5
12.3	3,60	5,5	19,8	6,0	21,6	6,0	21,6	6,0	21,6	6,0	21,6
12.4	6,19	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1
12.5	5,54	6,0	33,2	6,0	33,2	6,0	33,2	6,0	33,2	6,0	33,2
Zwischensumme:			108,5		119,8		119,3		113,3		114,5
13.1	35,32	1,9	67,1	6,0	211,9	6,0	211,9	5,2	183,6	2,3	81,2
13.2	37,28	4,5	167,8	6,0	223,7	4,2	156,6	6,0	223,7	2,5	93,2
13.3	24,85	3,8	94,4	3,0	74,6	5,3	131,7	4,5	111,8	3,4	84,5
Zwischensumme:			329,3		510,1		500,2		519,2		258,9
Hauptziel 1 Total:			1.035,2		998,6		1.238,4		1.232,4		913,2
21.1	70,01	5,8	406,0	6,0	420,0	6,0	420,0	6,0	420,0	3,5	245,0
21.2	41,16	1,6	65,9	3,0	123,5	6,0	247,0	6,0	247,0	5,2	214,0
Zwischensumme:			471,9		543,5		667,0		667,0		459,1
22.1	78,80	6,0	472,8	6,0	472,8	6,0	472,8	6,0	472,8	4,9	386,1
22.2	78,80	5,5	433,4	0,7	55,2	6,0	472,8	6,0	472,8	1,7	134,0
Zwischensumme:			906,2		528,0		945,6		945,6		520,1
23.1	3,84	3,0	11,5	1,0	3,8	3,0	11,5	3,0	11,5	6,0	23,0
23.2	28,61	3,0	85,8	6,0	171,6	6,0	171,6	6,0	171,6	4,4	125,9
23.3	17,60	2,2	38,7	1,0	17,6	3,0	52,8	3,0	52,8	4,6	80,9
Zwischensumme:			136,0		193,1		235,9		235,9		229,8
Hauptziel 2 Total:			1.514,1		1.264,5		1.848,5		1.848,5		1.209,0
31.1	4,10	1,0	4,1	1,8	7,4	6,0	24,6	4,4	18,0	0,8	3,3
31.2	11,01	2,7	29,7	6,0	66,1	6,0	66,1	6,0	66,1	1,4	15,4
31.3	15,25	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	91,5	6,0	91,5	0,0	0,0
31.4	11,26	3,8	42,8	6,0	67,6	6,0	67,6	4,9	55,2	1,0	11,3
31.5	16,12	6,0	96,7	6,0	96,7	5,7	91,9	5,2	83,8	1,2	19,3
Zwischensumme:			173,3		237,7		341,6		314,6		49,3
32.1	28,48	3,0	85,4	6,0	170,9	5,2	148,1	2,2	62,6	5,2	148,1
32.2	22,89	6,0	137,3	6,0	137,3	6,0	137,3	4,8	109,9	6,0	137,3
32.3	16,48	4,5	74,2	6,0	98,9	6,0	98,9	6,0	98,9	6,0	98,9
Zwischensumme:			296,9		407,1		384,3		271,4		384,3
33.1	23,18	6,0	139,1	1,3	30,1	6,0	139,1	2,2	51,0	2,2	51,0
33.2	24,92	3,0	74,8	6,0	149,5	6,0	149,5	6,0	149,5	4,1	102,2
33.3	9,72	6,0	58,3	4,5	43,7	6,0	58,3	6,0	58,3	6,0	58,3
33.4	11,12	6,0	66,7	1,1	12,2	6,0	66,7	4,5	50,1	4,8	53,4
33.5	16,61	6,0	99,6	3,0	49,8	6,0	99,6	6,0	99,6	4,8	79,7
33.6	18,44	6,0	110,6	1,2	22,1	6,0	110,6	6,0	110,6	2,5	46,1
Zwischensumme:			549,1		307,5		623,9		519,1		390,7
34.1	18,32	3,0	55,0	3,2	58,6	3,0	55,0	4,5	82,5	3,0	55,0
34.2	3,07	3,8	11,7	4,3	13,2	4,8	14,7	5,8	17,8	4,4	13,5
34.3	36,23	3,5	126,8	4,8	173,9	5,2	188,4	5,4	195,6	4,3	155,8
Zwischensumme:			193,4		245,7		258,1		295,9		224,3
Hauptziel 3 Total:			1.212,9		1.198,1		1.607,9		1.401,0		1.048,5
41.1	2,46	6,0	14,8	0,8	2,0	6,0	14,8	6,0	14,8	6,0	14,8
41.2	4,12	1,6	6,6	5,1	21,0	5,4	22,2	1,9	7,8	1,4	5,8
41.3	1,32	1,8	2,4	0,3	0,4	4,8	6,3	2,5	3,3	1,3	1,7
Zwischensumme:			23,7		23,4		43,3		25,9		22,2
42.1	3,21	2,2	7,1	4,2	13,5	6,0	19,2	4,7	15,1	5,3	17,0
42.2	3,84	2,1	8,1	5,5	21,1	4,2	16,1	3,8	14,6	3,0	11,5
42.3	4,47	3,7	16,5	6,0	26,8	3,7	16,5	3,0	13,4	2,6	11,6
42.4	3,72	1,2	4,5	6,0	22,3	3,5	13,0	3,0	11,1	4,5	16,7
42.5	7,27	1,6	11,6	6,0	43,6	6,0	43,6	5,2	37,8	5,7	41,5
Zwischensumme:			47,7		127,3		108,5		92,0		98,3
43.1	5,82	4,5	26,2	6,0	34,9	3,6	21,0	3,7	21,5	3,3	19,2
43.2	4,79	4,5	21,5	6,0	28,7	4,1	19,6	4,8	23,0	3,5	16,7
43.3	11,94	6,0	71,6	6,0	71,6	6,0	71,6	6,0	71,6	4,5	53,7
Zwischensumme:			119,4		135,3		112,2		116,1		89,7
44.1	4,21	3,7	15,6	6,0	25,3	6,0	25,3	4,5	19,0	3,2	13,5
44.2	3,51	4,0	14,1	5,0	17,6	5,6	19,7	5,5	19,3	5,5	19,3
44.3	5,04	3,6	18,1	4,9	24,7	4,6	23,2	4,5	22,7	4,0	20,2
Zwischensumme:			47,8		67,5		68,1		61,0		53,0
45.1	3,98	4,1	16,3	6,0	23,9	5,3	21,1	3,6	14,3	2,8	11,2
45.2	2,98	4,5	13,4	3,0	8,9	5,0	14,9	5,2	15,5	4,3	12,8
45.3	5,38	4,0	21,5	6,0	32,3	6,0	32,3	3,0	16,1	2,4	12,9
Zwischensumme:			51,2		65,1		68,3		46,0		36,9
46.1	4,62	5,0	23,1	6,0	27,7	5,0	23,1	4,3	19,9	4,7	21,7
46.2	6,17	3,0	18,5	6,0	37,0	3,0	18,5	3,0	18,5	3,0	18,5
46.3	9,75	4,2	40,9	6,0	58,5	4,5	43,9	4,1	40,0	4,3	41,9
46.4	6,11	3,0	18,3	6,0	36,6	2,2	13,4	2,0	12,2	1,6	9,8
Zwischensumme:			100,9		159,9		98,9		90,5		91,9
47.1	5,22	5,1	26,6	6,0	31,3	4,0	20,9	6,0	31,3	4,8	25,1
47.2	9,19	3,7	34,0	5,3	48,7	6,0	55,2	6,0	55,2	4,1	37,7
47.3	6,23	5,7	35,5	6,0	37,4	4,5	28,0	4,5	28,0	5,2	32,4
47.4	12,89	1,0	12,9	1,0	12,9	6,0	77,4	6,0	77,4	1,0	12,9
Zwischensumme:			109,0		130,3		181,4		191,9		108,0
48.1	3,78	3,5	13,2	4,0	15,1	6,0	22,7	6,0	22,7	4,7	17,8
48.2	6,54	1,7	11,1	2,1	13,7	6,0	39,3	5,7	37,3	3,9	25,5
48.3	9,24	3,4	31,4	6,0	55,5	5,5	50,8	4,1	37,9	4,6	42,5
48.4	5,20	3,0	15,6	5,3	27,6	6,0	31,2	6,0	31,2	4,0	20,8
48.5	11,48	5,5	63,1	6,0	68,9	6,0	68,9	6,0	68,9	5,0	57,4
Zwischensumme:			134,5		180,7		212,8		197,9		164,0
Hauptziel 4 Total:			634,2		889,5		893,6		821,3		664,0
Gesamtsumme:			4.444,2		4.418,3		5.646,6		5.364,2		3.887,7

Tabelle 8-5 Bewertung der Konzepte, Teil 2 (Alternative A_06 bis A_10)

Krit.-Nr.	Gewicht	A 11		A 12		A 13		A 14	
		Ringmodul		Gleit-Reib-Modul		LED-Strobe Zusatzgerät		LED-Strobe integriert	
		Note	Wert	Note	Wert	Note	Wert	Note	Wert
11.1	12,76	3,8	48,5	6,0	76,6	4,8	61,3	4,8	61,3
11.2	12,68	5,5	69,2	6,0	76,1	5,2	65,9	5,5	69,7
11.3	40,52	5,5	222,9	5,5	222,9	2,4	95,2	4,5	182,4
11.4	36,14	6,0	216,9	6,0	216,9	6,0	216,9	6,0	216,9
Zwischensumme:			557,5		592,4		439,3		530,2
12.1	2,07	3,8	7,9	6,0	12,4	2,2	4,6	5,2	10,8
12.2	2,56	4,5	11,5	6,0	15,4	5,8	14,9	6,0	15,4
12.3	3,60	6,0	21,6	6,0	21,6	6,0	21,6	5,2	18,7
12.4	6,19	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1	6,0	37,1
12.5	5,54	6,0	33,2	6,0	33,2	3,7	20,5	6,0	33,2
Zwischensumme:			111,4		119,8		98,7		115,3
13.1	35,32	3,5	123,6	6,0	211,9	6,0	211,9	6,0	211,9
13.2	37,28	0,8	29,8	6,0	223,7	6,0	223,7	6,0	223,7
13.3	24,85	3,2	79,5	6,0	149,1	1,4	34,8	1,4	34,8
Zwischensumme:			233,0		584,7		470,4		470,4
Hauptziel 1 Total:			901,8		1.296,9		1.008,4		1.115,9
21.1	70,01	4,2	294,0	6,0	420,0	4,8	336,0	6,0	420,0
21.2	41,16	4,5	185,2	6,0	247,0	6,0	247,0	6,0	247,0
Zwischensumme:			479,3		667,0		583,0		667,0
22.1	78,80	6,0	472,8	6,0	472,8	3,3	260,0	6,0	472,8
22.2	78,80	6,0	472,8	6,0	472,8	4,2	331,0	6,0	472,8
Zwischensumme:			945,6		945,6		591,0		945,6
23.1	3,84	4,7	18,0	6,0	23,0	1,0	3,8	1,0	3,8
23.2	28,61	6,0	171,6	0,6	17,2	6,0	171,6	6,0	171,6
23.3	17,60	4,5	79,2	0,8	14,1	1,2	21,1	1,2	21,1
Zwischensumme:			268,9		54,3		196,6		196,6
Hauptziel 2 Total:			1.693,7		1.666,9		1.370,6		1.809,2
31.1	4,10	2,0	8,2	0,7	2,9	4,5	18,4	4,5	18,4
31.2	11,01	1,5	16,5	5,3	58,4	6,0	66,1	6,0	66,1
31.3	15,25	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	91,5	6,0	91,5
31.4	11,26	3,0	33,8	1,5	16,9	6,0	67,6	6,0	67,6
31.5	16,12	3,0	48,4	1,0	16,1	3,0	48,4	3,0	48,4
Zwischensumme:			106,9		94,3		291,9		291,9
32.1	28,48	4,8	136,7	1,0	28,5	5,1	145,2	3,7	105,4
32.2	22,89	6,0	137,3	1,5	34,3	6,0	137,3	6,0	137,3
32.3	16,48	5,3	87,4	1,5	24,7	6,0	98,9	6,0	98,9
Zwischensumme:			361,4		87,5		381,5		341,6
33.1	23,18	3,0	69,5	5,1	118,2	2,4	55,6	4,8	111,3
33.2	24,92	3,0	74,8	1,5	37,4	3,7	92,2	3,7	92,2
33.3	9,72	6,0	58,3	6,0	58,3	6,0	58,3	6,0	58,3
33.4	11,12	4,5	50,1	4,5	50,1	3,0	33,4	5,2	57,8
33.5	16,61	6,0	99,6	3,0	49,8	2,7	44,8	1,4	23,2
33.6	18,44	1,3	24,0	1,1	20,3	2,6	47,9	3,5	64,5
Zwischensumme:			376,3		334,1		332,3		407,4
34.1	18,32	4,2	77,0	3,0	55,0	3,0	55,0	3,0	55,0
34.2	3,07	4,6	14,1	2,7	8,3	5,2	16,0	5,2	16,0
34.3	36,23	3,2	115,9	2,8	101,4	5,0	181,2	5,0	181,2
Zwischensumme:			207,0		164,7		252,1		252,1
Hauptziel 3 Total:			1.051,5		680,5		1.257,8		1.293,0
41.1	2,46	6,0	14,8	2,2	5,4	6,0	14,8	6,0	14,8
41.2	4,12	5,1	21,0	3,8	15,6	6,0	24,7	6,0	24,7
41.3	1,32	5,2	6,9	1,3	1,7	4,5	5,9	3,3	4,4
Zwischensumme:			42,6		22,8		45,4		43,8
42.1	3,21	6,0	19,2	4,5	14,4	4,5	14,4	4,5	14,4
42.2	3,84	5,2	20,0	5,6	21,5	5,4	20,7	5,2	20,0
42.3	4,47	5,2	23,2	4,8	21,4	5,0	22,3	5,0	22,3
42.4	3,72	5,2	19,3	5,2	19,3	4,3	16,0	3,8	14,1
42.5	7,27	6,0	43,6	6,0	43,6	5,2	37,8	6,0	43,6
Zwischensumme:			125,4		120,3		111,3		114,5
43.1	5,82	5,5	32,0	5,7	33,2	6,0	34,9	6,0	34,9
43.2	4,79	5,4	25,8	5,5	26,3	6,0	28,7	5,6	26,8
43.3	11,94	5,3	63,3	6,0	71,6	6,0	71,6	6,0	71,6
Zwischensumme:			121,1		131,1		135,3		133,4
44.1	4,21	6,0	25,3	2,0	8,4	6,0	25,3	6,0	25,3
44.2	3,51	6,0	21,1	4,6	16,2	4,2	14,8	4,2	14,8
44.3	5,04	6,0	30,2	3,6	18,1	2,4	12,1	2,4	12,1
Zwischensumme:			76,6		42,7		52,1		52,1
45.1	3,98	2,2	8,8	1,6	6,4	2,4	9,6	3,0	11,9
45.2	2,98	4,8	14,3	3,0	8,9	4,2	12,5	4,5	13,4
45.3	5,38	2,0	10,8	4,7	25,3	2,0	10,8	4,8	25,8
Zwischensumme:			33,8		40,6		32,8		51,2
46.1	4,62	3,1	14,3	3,5	16,2	6,0	27,7	6,0	27,7
46.2	6,17	3,0	18,5	2,1	13,0	6,0	37,0	6,0	37,0
46.3	9,75	5,3	51,7	4,7	45,8	6,0	58,5	6,0	58,5
46.4	6,11	2,6	15,9	3,0	18,3	6,0	36,6	6,0	36,6
Zwischensumme:			100,4		93,3		159,9		159,9
47.1	5,22	6,0	31,3	2,4	12,5	6,0	31,3	6,0	31,3
47.2	9,19	6,0	55,2	4,0	36,8	5,8	53,3	5,8	53,3
47.3	6,23	3,8	23,7	5,1	31,8	6,0	37,4	6,0	37,4
47.4	12,89	2,0	25,8	1,0	12,9	4,2	54,1	4,2	54,1
Zwischensumme:			135,9		94,0		176,2		176,2
48.1	3,78	4,3	16,3	2,0	7,6	5,5	20,8	6,0	22,7
48.2	6,54	3,5	22,9	1,3	8,5	3,6	23,6	4,4	28,8
48.3	9,24	5,8	53,6	5,7	52,7	5,8	53,6	5,3	49,0
48.4	5,20	4,8	25,0	2,4	12,5	6,0	31,2	5,3	27,6
48.5	11,48	4,9	56,2	5,0	57,4	3,5	40,2	3,5	40,2
Zwischensumme:			174,0		138,6		169,3		168,2
Hauptziel 4 Total:			809,8		683,4		882,3		899,2
Gesamtsumme:			4.533,5		4.370,4		4.571,1		5.169,4

Tabelle 8-6 Bewertung der Konzepte, Teil 3 (Alternative A_11 bis A_14)