

## **Messung der Ankopplungskräfte zur Beurteilung der Hand-Arm-Schwingungen – Weiterentwicklung eines Messsystems**

### **Measurement of the Coupling Forces for Evaluating the Hand-Arm Vibrations – Refinement of a Measuring System**

Dipl.-Ing. **Uwe Kaulbars**, BGIA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin;  
Dr. **Pierre Lemerle**, INRS, Laboratoire de Modélisation des Systèmes Mécaniques et de Prévention (MSMP), Département Ingénierie des Equipements de Travail, Vandoeuvre/F

#### **Kurzfassung:**

Die Kräfte der Ankopplung des Hand-Arm-Systems an die Maschine (Ankopplungskräfte) beeinflussen zum einen den gemessenen Schwingungswert und zum anderen die Schwingungsübertragung und damit die Schwingungsbelastung und -beanspruchung. In der DIN 45679 wurden die Ankopplungskräfte als Greif- und Andruckskräfte definiert und ein Mess- und Beurteilungsverfahren festgelegt. Weitere Definitionen sowie ein indirektes Messverfahren, das auf der Berechnung der Kräfte über die Erfassung der Druckverteilung an der Kontaktfläche „Hand-Maschine“ basiert, werden in ISO/DIS 15230 beschrieben.

Die dafür erforderliche Messtechnik wurde im Rahmen des von der EU geförderten Projektes „Vibtool“ entwickelt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden zur weiteren Optimierung des Messverfahrens typische Arbeitsgeräte in der Metallindustrie (Vertikal- und Winkelschleifer sowie Drehschrauber) untersucht.

Da die Griffgeometrie Grundlage der Kraftberechnungen ist, beeinflussen Abweichungen von zylindrischen Griffformen wie bei neuen Geräten, die ergonomisch geformte Griffe besitzen, die Messgenauigkeit erheblich.

Die Grundprinzipien des Messsystems, die Messergebnisse sowie ein Verfahren zur Berücksichtigung der exakten Griffgeometrie mittels einer einfachen 3D-Fotorekonstruktion werden dargestellt.

**Summary:**

The forces for coupling the hand-arm system to the machine (coupling forces) affect both the measured vibration value as well as the vibration transmission and hence the vibration load and stress. DIN 45679 defines the coupling forces as grip and feed forces and specifies a measuring and evaluation method. Further definitions and an indirect measuring method which is based on the calculation of the forces by recording the pressure distribution on the contact surface "man-machine interface" are described in ISO/DIS 15230.

The measuring system required for this has been developed as part of the "Vibtool" project funded by the EU. Based on these results, typical tools in the metal industry (vertical and angle grinders as well as screwdrivers) were examined for further optimisation of the measuring process. As the handle geometry forms the basis for the force calculations, deviations from cylindrical handle shapes, as occurring in new devices with ergonomically shaped handles, have a significant effect on the measuring accuracy.

When using a pneumatic screwdriver (which with the shape of a very small P handle is extremely different from the geometry of a cylindrical handle), deviations of the grip and feed forces at different underlying handle geometries were ascertained in the range from -26.3 % to 39.8 %.

The basic principles of the measuring system, the measuring results and a method for considering the exact handle geometry by means of a simple 3D photographic reconstruction are shown.

Further optimisation proposals for an improved adaptation of the sensors to the handle geometry are shown.

The comparison of a vibration-reduced angle grinder with a conventional vertical grinder showed that not only the low vibration emission but also the lower force application required can additionally reduce the hazard for the angle grinder.

The metrological complexity and expense is very high especially for ergonomically shaped handles and for handles with an integrated switch owing to the need to reconstruct the handle geometry. In the analysis of risk, it is not currently an explicit requirement to consider the coupling forces, but this is nevertheless important for the ergonomic design in order to avoid unnecessarily high coupling forces (for this cf. EU Practical Handbook [10]). When develop-

ing low-vibration machines and compiling vibration reduction programs, the coupling force and hence the total load must be reduced in order to minimise the vibrations transferred to the hand-arm system.

## 1. Einleitung

Die Arbeit mit vibrierenden handgehaltenen und handgeführten Werkzeugen und Arbeitsgeräten ist mit unterschiedlichem Kraftaufwand verbunden. Die Art und Größe der Ankopplungskräfte wird z. B. durch das Gerätegewicht, die Funktionsweise des Arbeitsgerätes und die Arbeitsaufgabe sowie durch die Griffgestaltung und den Übungsgrad des Benutzers beeinflusst. Aufgrund der heutigen Messmöglichkeiten wird die Beurteilungsgröße für die Gefährdung durch Vibration aus der am Griff bzw. Oberfläche des Handkontaktes gemessenen Beschleunigung gebildet. Jedoch wird die auf das Hand-Arm-System übertragene Schwingungseinwirkung im Wesentlichen durch die Ankopplungskraft mitbestimmt. So bewirkt eine stärkere Ankopplung eine Abnahme der gemessenen Beschleunigungswerte am Griff, da auf das Hand-Arm-System mehr Energie übertragen wird [1, 4]. Deshalb sollten nach der grundlegenden Norm zur Messung und Beurteilung der Hand-Arm-Vibration DIN EN ISO 5349 die Kräfte zwischen Hand und Griffstelle gemessen und angegeben werden. Als gegenläufiger Effekt zum kleineren Messwert wird die Schwingungsbelastung sowie die Beanspruchung des Hand-Arm-Systems größer [2].

Mit der DIN 45679 [1] wurden erstmalig terminologisch die verschiedenen Kräfte definiert und ein Mess- und Beurteilungsverfahren festgelegt. Die Begriffe der Greif- oder Andruckkraft orientieren sich an der in den 90er-Jahren zur Verfügung stehenden Messtechnik. So wird die Greifkraft als zangenartig wirkende Kraft definiert, die von der Hand beim Umschließen des Griffs innerhalb der Hand durch entgegengesetzte Teilkräfte kompensiert wird. Sie konnte bisher nur indirekt durch eine Messplattform ermittelt werden, auf der der Maschinenbenutzer stand. Weiterführende Definitionen der beim „Hand-Maschine-Kontakt“ wirkenden Kräfte werden in der ISO/DIS 15230 [3] beschrieben. Die in Bild 1 dargestellten Definitionen der Greif- und Andruckkraft stimmen in beiden Normen überein.

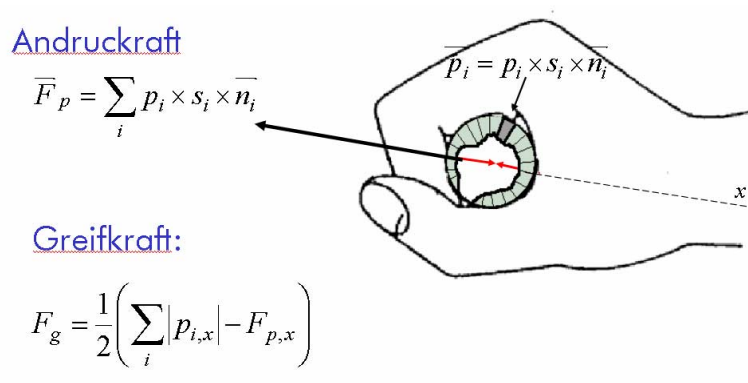


Bild 1: Definition der Ankopplungskräfte nach ISO/DIS 15230

Eine Beurteilung, wie sich die Höhe der Ankopplungskraft auf die Schwingungsbelastung auswirkt, enthält bisher ausschließlich die DIN 45679 [1]. Den Zusammenhang zwischen der Ankopplungskraft und der Korrektur der einwirkenden Schwingungen zeigt Bild 2.

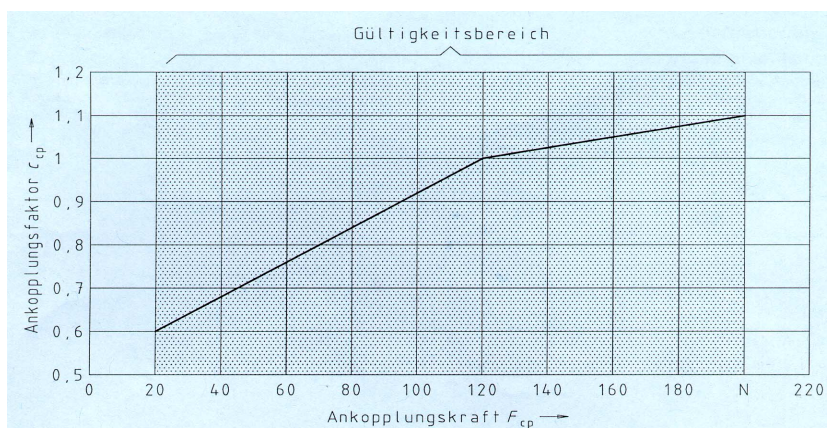


Bild 2: Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Ankopplungskräfte nach DIN 45679

Zur Beurteilung der Arbeitsplatzmessungen kann durch Multiplikation der Messgröße „frequenzbewertete Beschleunigung“ mit einem Ankopplungsfaktor die ankoppelungsabhängige Messgröße ermittelt werden. Das Verfahren fügt sich damit in die bereits bestehenden Mess- und Beurteilungsverfahren nach DIN EN ISO 5349 [2] ein. Mit der bisherigen Messtechnik, die auf der Basis von Dehnungsmessstreifen arbeitet, konnten die Kräfte nur unvollständig und summarisch erfasst werden. Im EU-Projekt „Vibtool“<sup>1</sup> [5, 6, 7, 9] wurde ein Messsystem entwickelt, mit dem die Größe und Verteilung der Ankopplungskräfte erfasst und analysiert werden kann.

## 2. Beschreibung der Messkette

Das System besteht aus einer elastischen Sensormatte in einer Verstärkereinheit mit A/D-Wandler und Akku-Stromversorgung, Kalibriereinrichtung und Software zur Datenaufbereitung (siehe Bild 3). Kernstück ist die mit einem kapazitiven Messprinzip arbeitende Sensormatte, mit der die Druckverteilung über 156 Sensoren erfasst werden kann. Die als „Finger-Matrix“ mit beweglichen Elementen ausgeführte Sensormatte ermöglicht die Anpassung an einen großen Bereich von üblichen Griffen.



<sup>1</sup> An dem Projekt unter der Leitung der Universität Politecnica Ancona (Italien) waren die Prüfinstitute CNR-Istituto per le Macchine Agricole e Movimento Terra (Italien), INRS – Institut National de Recherche et de Sécurité (Frankreich) sowie die Universität Southampton (Großbritannien) und die Fa. Novel GmbH (Deutschland) beteiligt.

Bild 3: Sensormatte, Verstärkereinheit mit Akku-Stromversorgung

## 3. Messmethode und Problemstellungen

Die im Vibtool-Projekt durchgeführte Erprobung beim betrieblichen Einsatz an unterschiedlichen Geräten zeigte, dass bei ergonomisch geformten Griffen Abweichungen zwischen berechneten und tatsächlichen Kräften auftreten. Ursache für diese Abweichungen ist, dass zur Berechnung der Teilkräfte  $F_{c,i}$  aus dem lokalen Druck die Winkelstellung des jeweiligen Sensorelementes zur Griffoberfläche für zylindrische Griffe nach folgender Gleichung eingeht (siehe Bild 4):

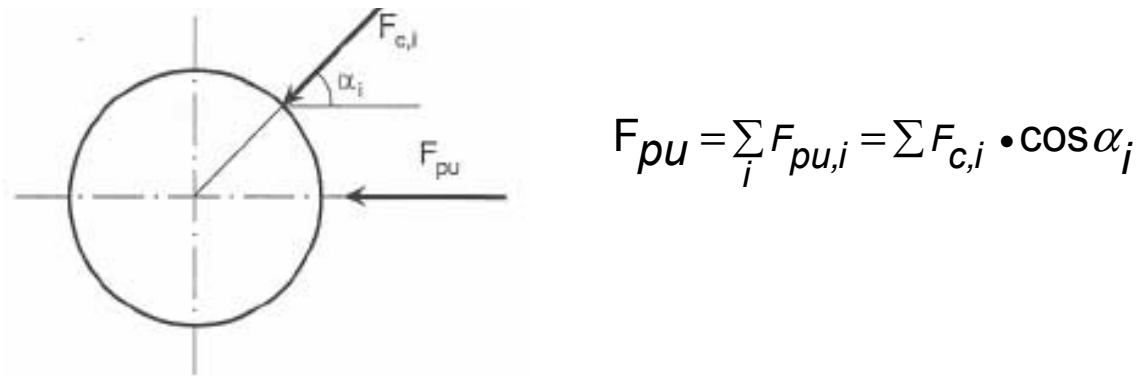


Bild 4: Winkelabhängigkeit für eine zylindrische Griffform

Beispielsweise lag für einen ergonomisch geformten Aufbruchhammergriff die Abweichung zwischen der näherungsweise Verwendung einer zylindrischen Griffform und der exakt vermessenen Griffform zwischen +20 und +60 % [5, 8].

#### 4. Methode zur Erfassung der Griffgeometrie

Die Erfassung der Griffoberfläche mit einem 3D-Laserscanner zeigte sich als sehr aufwändig und für die Erfassung vor Ort im Betrieb als ungeeignet. In einer Studienarbeit<sup>2</sup> in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Koblenz „Rhein Ahr Campus Remagen“ wurde verschiedene Bildbearbeitungssoftware hinsichtlich der notwendigen Genauigkeit und einfacher Anwendung untersucht. Mit der Software „RHINOCEROS“ kann mit Digitalfotos von handelsüblichen Fotoapparaten (BMP-/JPEG-Dateien) eine 3D-Fotorekonstruktion erfolgen (Beispiel siehe Bild 5).

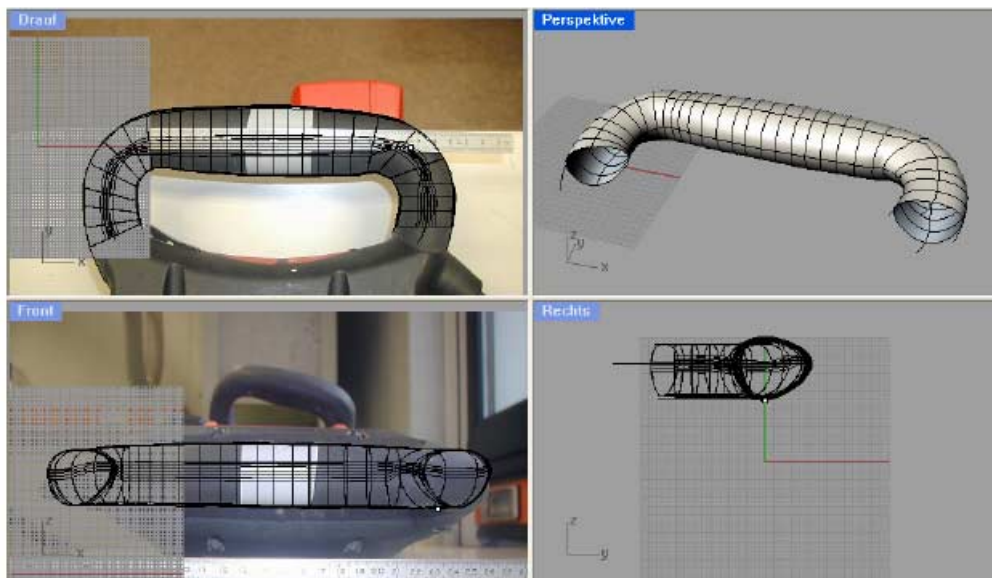


Bild 5: 3D-Fotorekonstruktion zur Ermittlung der Winkelstellungen

Tabelle 1 zeigt am Beispiel eines Meißelhammergriffes geringe Abweichungen zwischen der genauen Griffkonstruktion mittels Laserscanner und der 3D-Fotorekonstruktion.

Tabelle 1: Abweichungen der zylindrischen Griffgeometrie von der 3D-Fotorekonstruktion

	Exakte Griffgeometrie ermittelt durch		Abweichung [%]	Zylindrische Griffgeometrie
	3D-Fotorekonstruktion	3D-Scannen		
<b>Andruckkraft [N]</b>	<b>114,6</b>	<b>117,1</b>	<b>2,18</b>	<b>112,36</b>
<b>Greifkraft [N]</b>	<b>191,8</b>	<b>196,8</b>	<b>2,61</b>	<b>130,20</b>

<sup>2</sup> Derouiche, Baddreddine Fares: Bestimmung der Griffgeometrie von ergonomisch geformten Griffen als Berechnungsgrundlage zur Messung der Ankopplungskräfte an vibrierenden handgehaltenen Arbeitsmaschinen, Studienarbeit 2007

## 5. Messung der Ankopplungskräfte am Beispiel von Schleifern

Die Messungen erfolgten an einem herkömmlichen Vertikalschleifer und einem vibrationsgeminderten Winkelschleifer bei dem Arbeitsgang „Anschleifen einer Schleifphase“. Aufgrund der Anbringungsmöglichkeiten erfolgten die Messungen der Vibration und der Ankopplungskräfte nacheinander (Anbringung der Sensoren siehe Bilder 6 und 7). Bei dem nicht schwingungsgedämpften Hilfsgriff konnte ein zylindrischer Ersatzgriff für die Ankopplungskraftmessungen verwendet werden. Beim Hauptgriff erzeugt der über der Grifffläche positionierte Schalter eine stark unregelmäßige Oberfläche. Um eine Beschädigung der Sensor- matte zu vermeiden, wurde der Schalter einschließlich Griff mit einer dünnen Matte ummantelt. Bei dem herkömmlichen Vertikalschleifer (siehe Bild 8) waren keine besonderen Maßnahmen erforderlich.



Bild 6: Winkelschleifer mit Beschleunigungsaufnehmer (vibrationsgemindert)



Bild 7: Winkelschleifer mit modifiziertem Griff und „Finger-Matrix“



Bild 8: Herkömmlicher Vertikalschleifer

In Tabelle 2 sind Messwerte als Mittelwerte und Standardabweichungen von jeweils fünf Einzelmessungen zusammengefasst. Nach DIN 45679 wird die Ankopplungskraft aus der Summe aus Andruckkraft und Greifkraft wie folgt gebildet:

$$F_{cp} = F_{fe} + F_{gr}$$

Tabelle 2: Messergebnisse

Arbeitsgerät	Einleitungsstelle	Andruckkraft $F_{fe}$ [N]	Greifkraft $F_{gr}$ [N]	Ankopplungskraft $F_{cp}$ [N]	Schwingungsgesamtwert $a_{hv}$ in $m/s^2$
Winkelschleifer	Hauptgriff	25,7 ± 22,5	18,4 ± 12,9	44,1 ± 34,3	3,0 ± 0,2
	Seitengriff	11,6 ± 5,9	16,8 ± 23,4	28,4 ± 28,4	3,1 ± 0,2
Vertikalschleifer	Hauptgriff	56,5 ± 8,1	50,7 ± 5,5	107 ± 12	6,6 ± 0,3
	Seitengriff	42,7 ± 1,7	47,5 ± 4,8	82,0 ± 3,2	7,0 ± 0,6

Werden zur Gefährdungsbeurteilung nach DIN EN ISO 5349 der jeweils höhere Belastungswert der beiden Griffe herangezogen und der Ankopplungsfaktor  $C_{cp}$  nach DIN 45679 berücksichtigt, so errechnet sich der folgende ankopplungsabhängige Schwingungsgesamtwert  $a_{hvF}$ :

$$a_{hvF} = a_{hv} \cdot C_{cp}$$

Winkelschleifer  $a_{hvF} = 2,1 m/s^2$

Vertikalschleifer  $a_{hvF} = 6,3 m/s^2$



Die Belastungen beziehen sich für beide Geräte auf den Hauptgriff, da unter Berücksichtigung der Ankopplungskräfte die höheren Werte ermittelt wurden. Im Vergleich der beiden Schleifer zeigt sich, dass beim vibrationsgeminderten Winkelschleifer nicht nur durch den geringeren Vibrationswert, sondern auch durch den geringeren Kraftaufwand die Gefährdung weiter reduziert wird.

## 6. Messung der Ankopplungskräfte am Drehschrauber

Der druckluftbetriebene Drehschrauber wurde unter den typischen Einsatzbedingungen der Türmontage in der Automobilindustrie eingesetzt. Die besondere Problematik der Messungen an Geräten mit sehr kurzen Einschaltzeiten wie beim Drehschrauber von ca.  $t = 2\text{ s}$  liegt darin, praxisnahe und gleichzeitig reproduzierbare Messbedingungen der Vibrations- und Kraftmessungen sicherzustellen.

Die Messungen erfolgten daher unter simulierten Betriebsbedingungen an 10 Schraubvorgängen in einer Taktfolge von ca. 3 s (siehe Bild 9).



Bild 9: Simulierter Arbeitsablauf der Türmontage



Bild 10: „Finger-Matrix“ am Drehschrauber mit Angaben zum Griffdurchmesser

Zur Anbringung der Sensormatten mussten auch bei diesem Gerät der Griff leicht modifiziert und der Schalter blockiert werden (siehe Bild 10):

Die ersatzweise Steuerung per Fußschalter, die sich bei kontinuierlichen Arbeitsabläufen bewährt hatte, zeigte sich hier als ungeeignet. Ein genaues Einhalten der vorgegebenen

Taktfolge war daher nicht möglich. Die geringfügigen Abweichungen sind aus dem Zeitverlauf der Greif- und Andruckkraft in Bild 11 ersichtlich:

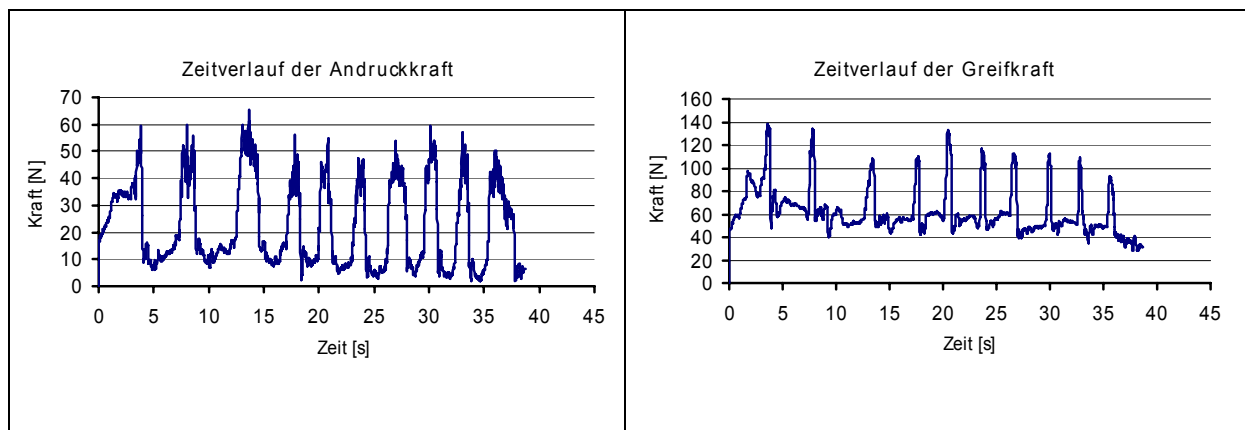


Bild 11: Zeitverlauf der Ankopplungskräfte

Wie aus Bild 10 ersichtlich, unterscheidet sich die Griffform des kleinen P-Griffes stark von der idealisierten Form eines zylindrischen Griffes. In Tabelle 3 sind die Abweichungen aus den Berechnungen eines näherungsweise herangezogenen Griffes mit einem Durchmesser von 60 mm bzw. 50 mm zu der exakt mit der 3D-Fotorekonstruktion ermittelten Geometrie dargestellt.

Tabelle 3: Abweichungen der Ergebnisse der zylindrischen Griffgeometrie von der 3D-Fotorekonstruktion

	Andruckkraft $F_{fe}$ [N]	Abweichung [%]	Greifkraft $F_{gr}$ [N]	Abweichung [%]	Ankopplungskraft $F_{cp}$ [N]	Abweichung [%]
Exakte Griff-geometrie	19,8± 4,49	-----	66,3± 3,38	-----	86,1± 6,08	-----
Zylindrische Griff-geometrie d = 50 mm	14,6± 4,32	- 26,3	67,9± 3,44	+2,5	82,6± 5,48	- 4,1
Zylindrische Griff-geometrie d = 60 mm	27,7± 5,77	39,8	69,3± 3,66	+4,5	97,0± 8,41	+12,6

Für den simulierten Arbeitsgang wurde ein Schwingungsgesamtwert  $a_{hv} = 4,36 \pm 0,39 \text{ m/s}^2$  ermittelt, der weit über der Herstellerangabe von  $< 2,5 \text{ m/s}^2$  liegt.

## 7. Optimierungsmöglichkeiten

Zur besseren Anpassung der Sensormatrix an ergonomisch geformte Griffe soll eine dreigeteilte Matrix entwickelt werden (erster Entwurf siehe Bild 12). Insbesondere bei kleiner Grifffläche können durch Überlappungen der Teilmatrizes kleine Radien vermieden werden.

Um den Aufwand der Ermittlung der Griffgeometrie mittels 3D-Fotorekonstruktion zu reduzieren, kann anstatt einer individuellen Ermittlung eine Typisierung verschiedener Griffgeometrien erfolgen. Durch Ersatz des zylindrischen Griffes durch eine verbesserte typisierte Annäherung an die tatsächliche Griffform soll die Abweichung auf ein vertretbares Maß reduziert werden.

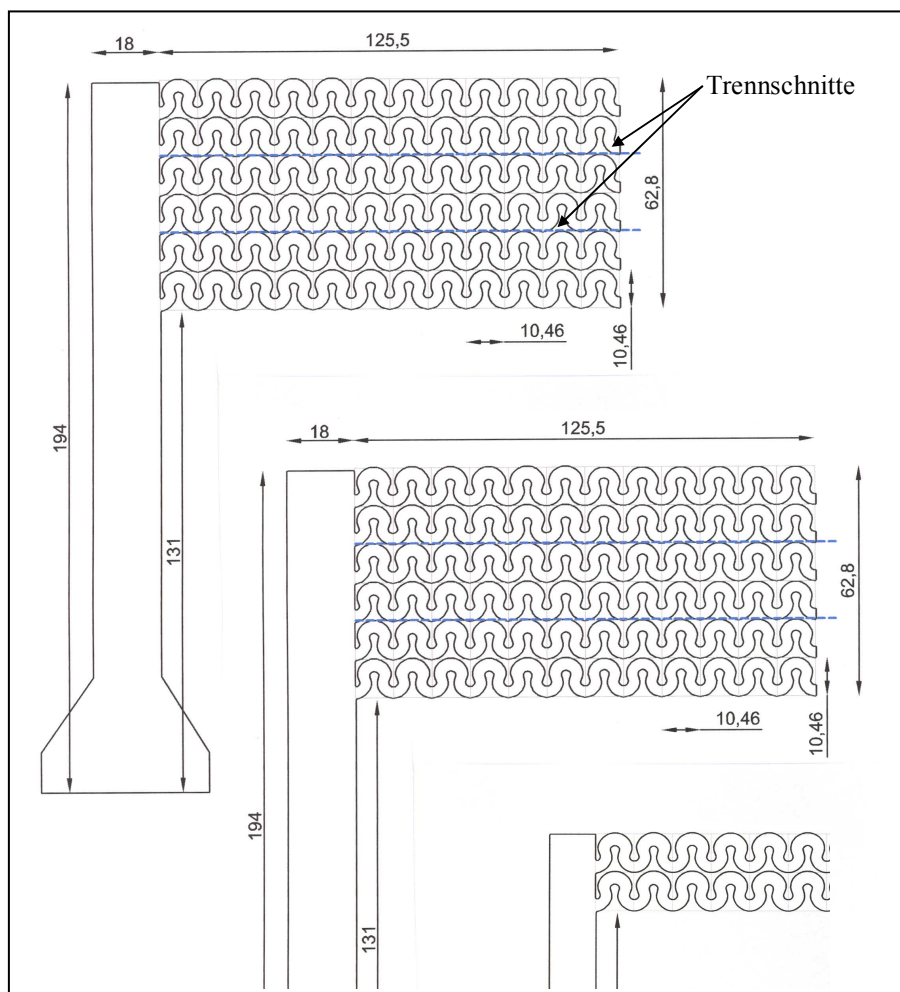


Bild 12: Neuer Sensor in Teilelementen

## 8. Zusammenfassung

Die Ankopplungskräfte von vibrierenden handgehaltenen und handgeführten Arbeitsgeräten und Maschinen können unter betrieblichen Einsatzbedingungen ermittelt werden. Mit ISO/DIS 15230 und DIN 45679 stehen Normen zur Messung und Beurteilung zur Verfügung. Der messtechnische Aufwand ist insbesondere bei ergonomisch geformten Griffen und bei Griffen mit integriertem Schalter durch die erforderliche Rekonstruktion der Griffgeometrie sehr hoch. Bei der Gefährdungsanalyse wird die Berücksichtigung der Ankopplungskräfte derzeit nicht explizit gefordert, sie ist jedoch wichtig für die ergonomische Gestaltung, um unnötig hohe Ankopplungskräfte zu vermeiden (vgl. dazu EU-Praxishandbuch [10]). Bei der Entwicklung vibrationsarmer Maschinen und zur Erstellung von Vibrationsminderungsprogrammen ist zur Minimierung der auf das Hand-Arm-System übertragenen Vibrationen ebenfalls die Ankopplungskraft und somit die Gesamtbelastung zu reduzieren.

## 8. Literatur

- [1] DIN 45679, 2005-09: Mechanical vibration – Measurement and evaluation of the grip and feed forces for assessing the exposure of the hand-arm system to vibration
- [2] DIN EN ISO 5349-1: Mechanische Schwingungen – Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 5349-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO 5349-1:2001
- [3] ISO/DIS 15230, (draft standard), 2005-09: Mechanical vibration and shock – Coupling forces at the machine-man interface for hand-transmitted vibration
- [4] Scheffer, M.; Kaulbars, U.: Forschungsbericht Hand-Arm-Schwingungen III. Wirkung von Greif- und Andruckkraft unter Schwingungsbelastung, published by: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin, June 1992
- [5] Kaulbars, U.: Schwingungen fest im Griff – neues System zur Messung der Ankopplungskräfte. Technische Überwachung Vol. 47 (2006), No. 6, pp. 35 – 40.
- [6] Tomasini, E.P.: A GRIP FORCE MAPPING FOR CHARACTERIZATION OF HAND-HELD VIBRATING TOOLS: AN OVERVIEW OF THE EUROPEAN PROJECT VIBTOOL, pp. 473 – 480, 11 International Conference on Hand-Arm Vibration, Bologna (Italy), 3.-7. June 2007, Proceedings edited by Bovenzin M. et.all.
- [7] Lemerle, P. et all: DEVELOPMENT AND VALIDATION OF AN ACCURATE TESTING-PROCEDURE TO MEASURE COUPLING FORCES AND CHARACTERIZE THE MAN/MACHINE INTERACTION, pp. 497 – 507, 11 International Conference on Hand-

- Arm Vibration, Bologna (Italy), 3.-7. June 2007, Proceedings edited by Bovenzin M. et.all.
- [8] Kaulbars, U.: Measurement of hand forces on vibrating tools: influence of the handle geometry upon calculation of the coupling forces. ESM emed scientific meeting 2006
- [9] Kaulbars, U.; Concettoni, E.: INDUSTRIAL TRIALS OF A SYSTEM FOR MEASUREMENT OF COUPLING FORCES, pp. 481 – 488, 11 International Conference on Hand-Arm Vibration, Bologna (Italy), 3.-7. June 2007, Proceedings edited by Bovenzin M. et.all.
- [10] EU-Handbuch zum Thema Hand-Arm-Schwingungen. Rechtlich nicht bindendes Handbuch im Hinblick auf die Umsetzung der Richtlinie 2002/44/EG über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Schwingungen),  
<http://www.humanvibration.com/EU/VIBGUIDE/HAV%20Guide%20German%20translation%20060606.pdf>