

UNTERSTÜTZUNG DER KONSTRUIERUNG VON MASCHINEN-GESTELL- STRUKTUREN MIT HILFE DER FINITE-ELEMENT-METHODE

Zusammenfassung. In diesem Beitrag wurden besondere Merkmale des FE-Systems ANSYS angegeben, das über viele nichtlineare Berechnungsmöglichkeiten verfügt. Eine Modellierungsmethode des nichtlinearen Verhaltens der Kontaktzone von Gestellverbindungen wurde dargestellt, die eine Verwendung spezieller Kontaktelemente zur Berechnung ihres statischen Verformungsverhaltens voraussetzt. Es wurden auch einige FE-Berechnungsergebnisse der Modellgestellen gezeigt.

1. Einführung

Große Rationalisierungsmöglichkeiten des Konstruktionsprozesses von Maschinen-Gestell-Strukturen (MGS) liegen in der Anwendung der CAD-Systeme [1]. Über die Effektivität der Einführung dieser Systeme in die heutige Projektierungs- und Konstruktionspraxis entscheidet die Glaubwürdigkeit der vorgeschlagenen Berechnungsmethoden sowie auch ihre Komplexität.

Die wirksamste Analysenmethode der mechanischen Konstruktion ist die Finite-Element-Methode (FEM). Diese Methode hat sich gegenwärtig zu einer Standardanwendung im Bereich der computerunterstützten Berechnungen entwickelt [2].

Die Herstellung eines voll adäquaten Modells der MGS erfordert eine Erfassung sowohl der Verformungen der eigenen Gestelle als auch eine Nachgiebigkeit der Verbindungsstellen. Die letzten stellen die Unstetigkeitsstellen im Spannungsfluß dar. Ihre konstruktive Ausführung hat einen großen Einfluß auf das statische und dynamische Verhalten der Maschinen. Allgemein gilt, daß die aus der Gestellverbindungen resultierenden ungewollten Relativbewegungen (im Angriffspunkt der Arbeitsbelastung) vom statischen Verformungsverhalten selbst, sowie von deren Lage innerhalb der Maschinenstruktur abhängig sind.

Aus den Untersuchungen ist bekannt, daß das statische Verformungsverhalten der Gestellverbindung im wesentlichen durch das Kontakt-Verformungsverhalten der Trennfuge bestimmt wird [3]. Die Modellierung dieser letzten bereitet eine wesentliche Schwierigkeit. Dies folgt aus der Tatsache, daß hier die nichtlinearen physikalischen Charakteristiken der Kontaktzone und der Effekt des Klaffens auftreten.

In der vorliegenden Arbeit werden Lösungen für statische Kontaktaufgaben unter Berücksichtigung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit diskutiert, bei denen zur

Modellierung des nichtlinearen Verhaltens in der Kontaktzone ein spezielles Kontaktelement verwendet wird. Die vorgestellten Berechnungen wurden mit dem bekannten FE-Programm ANSYS durchgeführt, das über viele nichtlineare Berechnungsmöglichkeiten verfügt [4].

Diese Arbeit entstand während des Aufenthaltes (im Rahmen des TEMPUS Programms-JEP Nr 1005) am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart.

2. Besondere Merkmale des FE-Programms ANSYS

In vielen Ländern werden heutzutage zahlreiche universelle Berechnungssysteme angewendet, die unter anderem zur statischen Analyse der Konstruktion mit Hilfe der FE-Methode bestimmt sind.

Eines der führenden FE-Programme ist das ANSYS-System. Das ist ein Produkt der Firma SASI (Swanson Analysis Systems Inc., Houston, USA). ANSYS ist ein typischer Vertreter eines "General Purpose Programms" und bietet dabei eines der breitesten Anwendungsspektren. Mit seinen integrierten Pre- und Postprozessoren ist es in die Gruppe der "Stand-Alone-Programmsysteme" einzuordnen. Dieses FE-System ist auch auf einer sehr großen Anzahl von Rechnersystemen - angefangen von relativ einfachen Personal Computer bis hin zum Groß- und Superrechner - lauffähig.

Unter dem Hauptprogramm ANSYS sind verschiedene Programme integriert. Die einzelnen Programme können - nach ihrer Funktion angeordnet - in Preprozessoren, Berechnungsprogramme, Postprozessoren und Hilfsprogramme gegliedert werden. Die notwendige Kommunikation zwischen dem Benutzer und ANSYS findet über sogenannte Ein- und Ausgabedateien statt. Spezielle Ein- und Ausgabedateien sind die Tastatur und der Bildschirm. ANSYS bietet mit seinen verschiedenen Analysearten ein sehr breites Spektrum von Möglichkeiten, die verschiedensten Problemstellungen der Ingenieurwissenschaften zu berechnen. Dies wird unter anderen von der umfangreichen Elementbibliothek begünstigt [4].

Neben der Berechnung linearer Probleme ist es mit ANSYS auch möglich nichtlineare Probleme zu berechnen. In Abhängigkeit von der Analyseart und den verwendeten Elementen sind folgende Nichtlinearitäten verfügbar:

- Geometrienichtlinearitäten durch veränderliche Kontaktgeometrie als Resultat der großen Verformungen (*Large Deflection*) oder Spannungsverfestigung (*Stress Stiffening*),
- Materialnichtlinearitäten als Resultat eines nichtlinearen Zusammenhangs zwischen der Spannung und der Dehnung eines Werkstoffgesetzes (nichtlineare Plastizität oder Elastizität und auch zeitabhängige Kriechen oder Schwellen),
- Strukturnichtlinearitäten, die sich aus der zu berechnenden Struktur ergeben, wie z. B. veränderliche Randbedingungen (Spalte, Kontaktflächen und Reibung) oder nichtlineare Federn.

Lösung der so formulierten nichtlinearen Probleme erfordert eine iterative Vorgehensweise bei den Berechnungen. Deshalb werden in ANSYS verschiedene Lösungsstrategien nach dem Newton-Raphson Algorithmus angeboten [4]:

- Volle Newton-Raphson-Iterationstechnik,
- Modifizierte Newton-Raphson-Iterationstechnik,
- Initial-Stiffness Newton-Raphson-Iterationstechnik.

Als Belastungsgrößen können in ANSYS unter anderen Knotenkräfte und -verschiebungen oder auch Elementlasten im Form von Drücken und Temperaturen vorliegen.

3. Modellierungsmethode des nichtlinearen Verhaltens der Kontaktzone

Aus den experimentellen Untersuchungen ist bekannt, daß das nichtlineare Verhalten der Gestellstrukturen im Öffnungsmechanismus der Kontaktfuge (geometrische Nichtlinearität) und auch im Verformungsmechanismus der Kontaktzone (physikalische Nichtlinearität) bestehen [5].

Eine Grundvoraussetzung des vorgeschlagenen FE-Verfahrens ist die Behandlung des Kontaktproblems als nichtlineare Verformungsanalyse einer Gesamtstruktur, bestehend aus verformbaren Gestellen, die durch nichtlineare (die Kontaktzone repräsentierende) FE-Kontakt Elemente (*gap elements*), miteinander verbunden sind.

Um das Steifigkeitsverhalten der Kontaktelemente in einem FE-Modell zu berücksichtigen, ist es notwendig reale Charakteristiken zwischen Verschiebungen und Belastungen in den real belasteten Preßflächen zu erkennen. Aufgrund der Untersuchungen wurde angenommen, daß im Betriebszustand der Maschine diese einen überwiegend elastischen Charakter haben [5].

Für die Kontakt-Normalverschiebung δ_n als Funktion der in der Trennfuge wirkenden Flächenpressungen σ (Bild 1a), kann man nach Levina eine Beziehung der Form

$$\delta_n = c \cdot |\sigma|^m \quad (1)$$

annehmen [5], in der c und m von der Oberflächenbeschaffenheit und von Werkstoff abhängige Parameter sind.

Den Koeffizienten der Normalkontaktsteifigkeit (k_n) bestimmt man aus der Ableitung der normalen Kraft nach der normalen Verschiebung. Für die Einheitsfläche gilt die Beziehung:

$$k = \frac{|\sigma|^{1-m}}{c \cdot m} \quad (2)$$

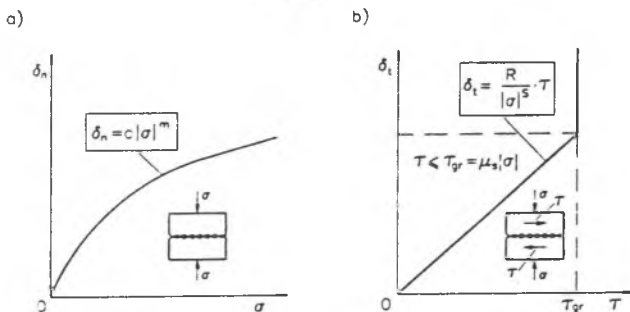


Bild 1. Verhalten der Kontaktzone in normaler (a) und tangentialer (b) Richtung

Die Abhängigkeit der tangentialen Verschiebungen δ_t von den Schubspannungen τ (Bild 1b) kann man (auf Grund experimenteller Untersuchungen von Kirsanova) in Form der Beziehung angeben [5]:

$$\delta_t = \frac{1}{k_t} \tau \quad (3)$$

in der k_t eine Tangentialkontaktsteifigkeit im elastischen Bereich bestimmt ist. Es ist charakteristisch, daß diese letzte von der wirkenden Normalpressung σ abhängig ist:

$$k_t = \frac{|\sigma|^S}{R} \quad (4)$$

wobei R und S Parameter sind, die von Werkstoffeigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit abhängen [5].

Die Werte der Kontaktkoeffizienten c , m , R , und S (aus der Literatur und eigener Untersuchungen) wurden in einer Datenbasis zusammengestellt [6]. Zur Zeit enthält diese Basis über hundertfünfzig Kontaktpaarungen

Von den FE-Kontaktelementen, die beide gegenseitigwirkende Kontaktflächen der Gestellelemente verbinden, werden folgende Eigenschaften gefordert:

- Zugkräfte in Normalrichtung können nicht übertragen werden,
- Tangentialkräfte werden durch ein Reibgesetz bestimmt.

Die Lösung der so formulierten Kontaktaufgabe erfordert eine Ausarbeitung eines neuen Berechnungsablaufes. Bild 2 zeigt den vorgeschlagenen Ablauf der FE-Berechnungen mit ANSYS. Im Vergleich zu linearen Problemen muß man diese Berechnungen in vielen Iterationsschritten führen. Nach jeder Iteration prüft man, in welchem Zustand sich einzelne Kontaktelemente befinden (Adhäsions-, Gleit- bzw. Klaffungszustand). Dieser Prozeß verläuft automatisch nach schon obenerwähnten Iterationsprozeduren. Jedoch muß man jedesmal für jeden Zyklus manuell Startwerte für Kontaktelemente (k_n und k_t) bestimmen. Die Anzahl der notwendigen Iterationsschritte folgt aus der Summe der Iterationen innerhalb der einzelnen automatisch geführten Zyklen.

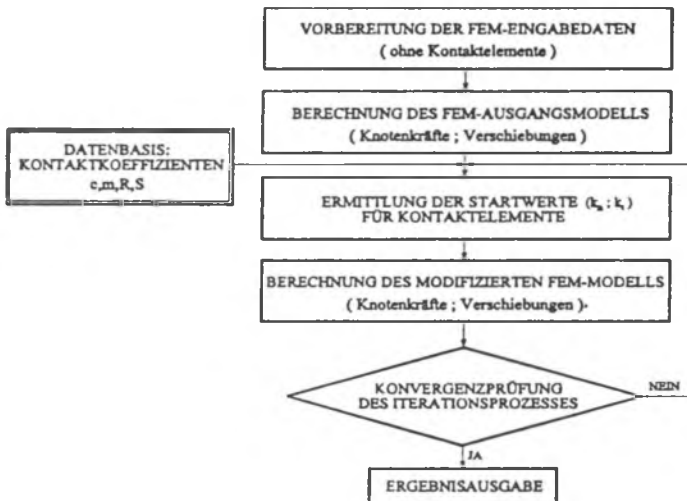


Bild 2. Ablauf der statischen Berechnung eines FE-Modells mit Verbindungsstellen

4. Numerische Beispiele

4.1 Einschraubenverbindung

Als ein Testbeispiel wurde eine Einschraubenverbindung angenommen, bestehend aus einem Flansch, der an eine steife Grundplatte mit einer Schraube M 20 gespannt wird. Die Vorspannkraft dieser Schraube wurde mittels DMS kontrolliert. Die wichtigsten Abmessungen sind: nominale Kontaktfläche (10 000 mm²) und Flanschdicke (100 mm).

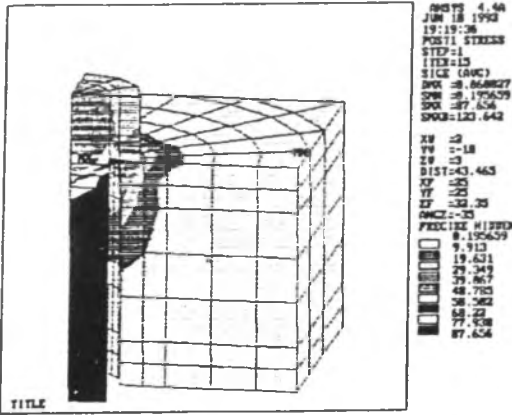


Bild 3. FEM-Modell einer Einschraubenverbindung und Querschnittsspannungsverlauf (für $F_w = 20.0$ kN)

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen [5] haben erlaubt, die Werte des bereits erwähnten Kontaktkoeffizienten für verschiedene Bearbeitungsverfahren von Kontaktflächen zu ermitteln.

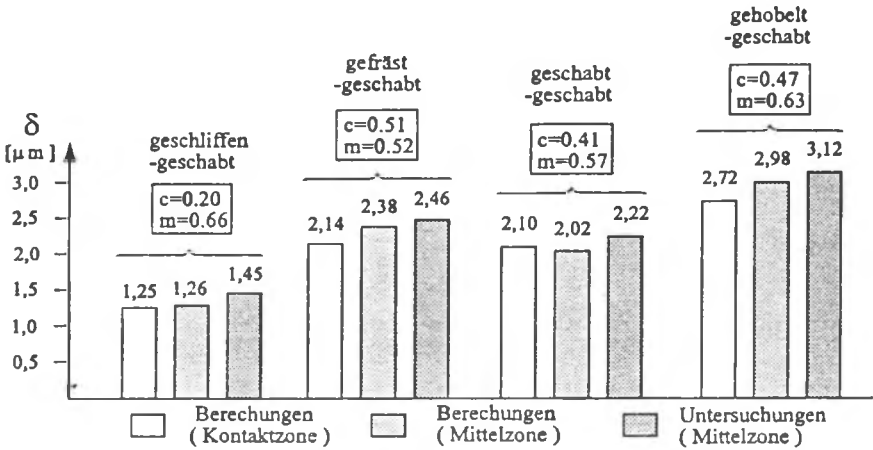


Bild 4. Vergleich der Berechnungs- und Untersuchungsergebnisse für verschiedene Bearbeitungsverfahren von Berührungsoberflächen (für $F_w = 20.0$ kN)

Das FEM-Berechnungsmodell dieser Konstruktion bildet das Viertel und dies aufgrund der Symetriebedingungen (Bild 3). Zur Modellierung des Flansches und der Schraube hat man räumliche (3-D) isoparametrische Elemente vom Typ STIF-45 angewandt. Die Kontaktschicht wurde dagegen mit finiten Kontaktelementen vom Typ STIF-52 modelliert, für die Zahlenwerte der Koeffizienten k_n und k_t ermittelt wurden. Zur Lösung der Aufgabe wurde die Initial-Stiffness Newton-Raphson-Iterationstechnik angewandt, die sich durch sehr gute Konvergenz der Berechnungsergebnisse auszeichnete.

In Bild 4 wurde eine Sammelzusammenstellung von Berechnungs- und Untersuchungsergebnissen dargestellt, die die Verschiebungen in der Kontakt- sowie in der Mittelzone bei Vorspannung der Schraube (F_w) von 20.0 kN bilden. Die oben genannten Berechnungen wurden mit Hilfe des Computers IBM - PC 386 durchgeführt.

4.2 Mehrschraubenverbindung

Der praktische Einsatz des FE-Systems ANSYS bei den Berechnungen der Tragstrukturen wurde am Beispiel eines Modellsystems gezeigt. Dieses System wurde von einem geschweißten Stahlkörper, verschraubt (8 Schrauben mit $F_w=10.0$ kN) auf einer als starr angenommenen Grundplatte gebildet. Die wichtigsten Abmessungen des Körpers sind: Querschnitt des Flansches (270 x 270 mm), Querschnitt des Ständers (220 x 220 mm), Gesamthöhe (550 mm), Flanschdicke (20 mm) und Wandstärke (10 mm).

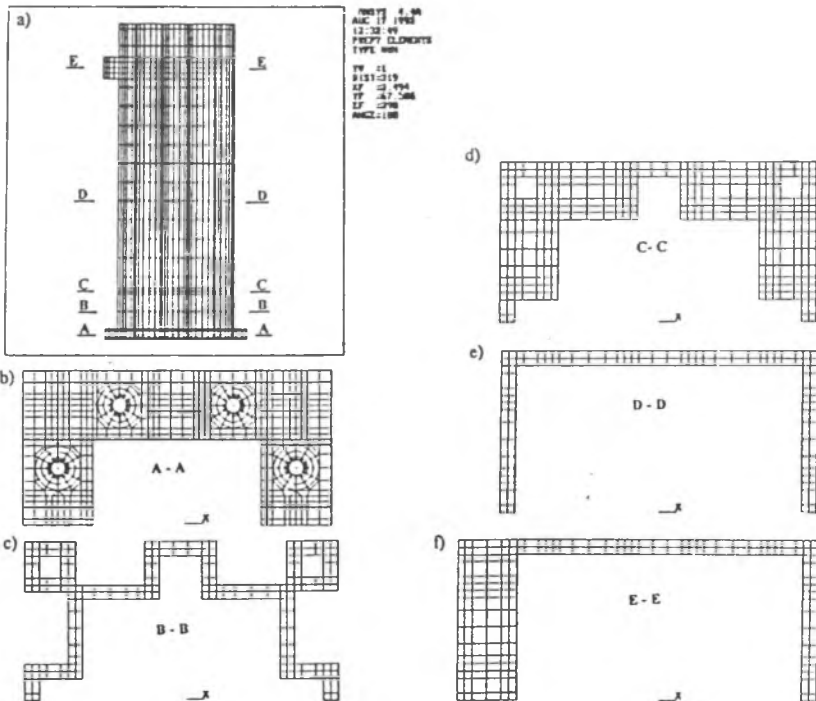


Bild 5. FEM-Rechenmodell eines Modellgestells (a) mit bestimmten Querschnitten (b)-(f)

Die äußere Belastung ($F_X=10.0$ kN) wurde auf der Höhe von 500 mm gebracht. Durch Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften der Struktur wurde es möglich nur die Hälfte der Struktur zu betrachten. In der Ebene der Symetrie wurden Randbedingungen angenommen, die die Erhaltung der Stetigkeit der Konstruktion erlauben. Die Vernetzung wurde so gestaltet, daß die reale Geometrie des Modellgestells (mit einer "Taschengestaltung") möglich genau abgebildet wird. Das FEM-Netz dieses Modells und entsprechende seine Querschnitte wurden in Bild 5 gezeigt. Zur Modellierung des Flansches, der Seitenwände und Schrauben wurden 3-D isoparametrische Elemente (mit 8 Knoten) vom Typ STIF-45 angewandt. Die Kontaktschicht wurde dagegen mit den GAP-Elementen vom Typ STIF-52 modelliert, für die Zahlenwerte der Steifigkeitskoeffizienten k_n und k_t manuell ermittelt wurden.

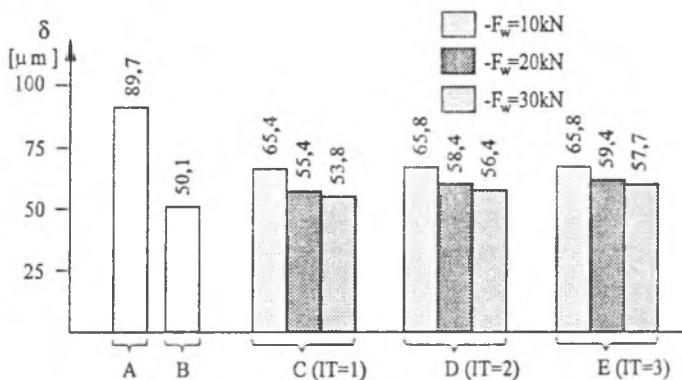


Bild 6. Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse eines Modellgestells (Säule A - für starre Befestigung des Flansches an Stellen der Schrauben; Säule B - für starre Befestigung des ganzen Flansches; Säulen C, D, E - für drei nacheinanderfolgende Iterationszyklen)

In Hinsicht auf die Modellgröße wurden die Berechnungen auf Cray-2 durchgeführt, wobei die Berechnungszeit für ein Iterationszyklus etwa 1.5 Stunden betrug.

In Bild 6 wurden (in Form eines Säulendiagrammes) die Berechnungsergebnisse des Modellsystems dargestellt. Und so wurde im ersten Fall (Säule A) eine starre Befestigung des Körpers an den Schraubenstellen vorausgesetzt. Der Übrige Teil des Flansches hat unbegrenzte Verschiebungsmöglichkeiten. Im zweiten Fall (Säule B) unterliegt die Funktion der Schrauben keiner Änderung. Zusätzlich wurde die Möglichkeit der Flanschverschiebung beschränkt. Die dargestellten Berechnungsmodelle zeigen eine einfache Anwendung der Finite-Element-Methode, die die Möglichkeit gibt, das reale Verhalten des Systems "von oben" und "von unten" zu schätzen. Auf ihrer Grundlage kann man die Einwirkung der Verbindung auf die Verformungen dieses Systems einschätzen, die in der Ebene der Außenbelastungswirkung bestimmt wurden. Die nächsten Säulen (C, D, E) dagegen stellen die Berechnungsergebnisse (für die drei Iterationszyklen und drei Vor-spannkarte) des modellierten Systems dar, unter Berücksichtigung der elastischen Eigenschaften des Kontaktzone und des Flansches selbst.

Genauere Analysen zu dem gesamten Problem der Modellierung von Verbindungsstellen sind in der Studienarbeit von A. Korczyński [7] enthalten.

5. Zusammenfassung

In Anbetracht des großen Einflusses der Verbindungsstellen auf das statische Verformungsverhalten von Maschinen-Gestell-Strukturen ist es notwendig, bei der Bewertung eines konstruktiven Entwurfes diese mit einzubeziehen. Besondere Möglichkeiten bietet in dem Fall das FE-System ANSYS an, das über viele nichtlineare Berechnungsmöglichkeiten verfügt.

Eine Grundvoraussetzung des vorgeschlagenen FE-Verfahrens ist die Behandlung des Kontaktproblems als nichtlineare Verformungsanalyse einer Gesamtstruktur, bestehend aus verformbaren Gestellen, die durch nichtlineare (die Kontaktzone repräsentierende) fiktiven FE-Kontaktelemente (*gap elements*), miteinander verbunden sind.

Zur Überprüfung der theoretischen Zusammenhänge und des vorgeschlagenen Algorithmus wurden Verformungen von Modellverbindungen berechnet und ein Vergleich mit vorhandenen experimentell ermittelten Werten durchgeführt.

Literaturverzeichnis

- [1] Eversheim, W., König, W., Weck, M., Pfeifer, T.: Auf dem Weg zu integrierten Systemen. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. VDI Verlag, Düsseldorf 1987.
- [2] Eversheim, W., König, W., Weck, M., Pfeifer, T.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium VDI Verlag, Düsseldorf 1993.
- [3] Iżykowski, S.: Połączenia śrubowe korpusów obrabiarek. Mechanik Nr 11, 1985
- [4] De Salvo, G. T., Gorman, R. W.: ANSYS-Engineering Analysis-System. Users Manuel, For ANSYS Revision 4.4, Houston. 1989.
- [5] Koch, J., u. a.: Obliczanie i badanie korpusów obrabiarek. Prace Naukowe Inst. Technol. Bud. Masz. PWR. Nr 28, Serii Monografie Nr 4, Wrocław. 1984.
- [6] Iżykowski, S.: Badania nieliniowej podatności styków w połączeniach korpusów obrabiarek. Konferencja Naukowa: Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn. Wrocław 1993,
- [7] Korczyński, A.: Analyse der Nützlichkeit des FE-Systems ANSYS zur Modellierung von Verbindungsstellen. Studienarbeit am Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart. 1993, nicht veröffentlicht.

Gutachter: Gabriel Wróbel