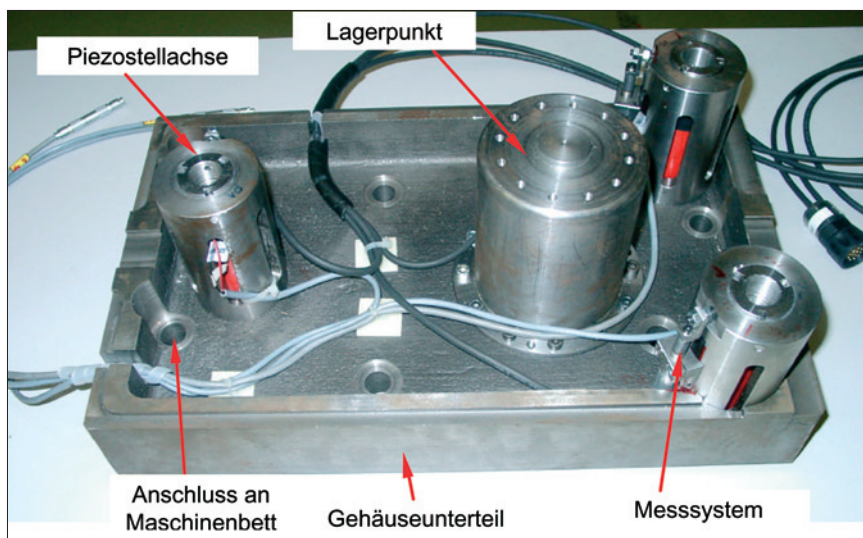


Die Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine wird maßgeblich von Deformationen der Maschinenstruktur aus Prozesslasten sowie durch geometrische Fertigungs- und Montagefehler der Maschinenkomponenten geprägt.

Aktorische Stellglieder können die Arbeitsgenauigkeit zwar steigern, sie verursachen aber hohe Kosten. Wesentlich effizienter lässt sich die aktive Kompensation mittels Adaptronik betreiben, wie die Konzeption einer adaptronischen Strebe für Parallelkinematiken zeigt. JÜRGEN FLEISCHER UND CHRISTIAN MUNZINGER

Aktiver Ausgleich durch Adaptronik



1 Piezoaktorische Stelleinrichtung zum Ausgleich von Maschinenverlagerungen aus dem BMBF-Leitprojekt ›Accomat‹

► Neben geringen Lebenszykluskosten oder einer hohen Maschinendynamik zählt die Arbeitsgenauigkeit zu den zentralen Bewertungskriterien einer Werkzeugmaschine. Abhängig ist die Arbeitsgenauigkeit von zahlreichen Einflussfaktoren: Thermische Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück oder Deformationen der Maschinenstruktur aus statischen, quasistatischen und dynamischen Prozesslasten sind ebenso zu nennen wie geometrische Abweichungen aus Fertigungs- und Montagefehlern der Maschinenkomponenten. Im Werkzeugma-

schinenbau zählt die Steigerung der Volumengenauigkeit am Werkstück deshalb zu den zentralen Forderungen an künftige Maschinengenerationen.

Die genauigkeitsgeregelte Drehmaschine als Ausgangsbasis

Bereits im Rahmen des BMBF-Leitprojekts ›Accomat‹ wurde am Institut für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe gemeinsam mit Gildemeister Drehmaschinen, Bielefeld, an einer genauigkeitsgeregelten Drehmaschine ge-

arbeitet. Hauptziel war die Kompensation thermisch bedingter Winkelverlagerungen des Spindelstocks mit Hilfe einer aktiven Kompensationseinrichtung [1]. Gildemeister Drehmaschinen entwickelte hierzu einen Versuchsträger, der mit einem neuen Verfahren zur Thermokompensa-

i INSTITUT
 Institut für Produktionstechnik (wbk)
 Universität Karlsruhe
 76128 Karlsruhe
 Tel. 07 21/6 08-24 49
 Fax 07 21/69 91 53
 www.wbk-ka.de

tion ausgestattet war. Das Institut für Produktionstechnik nutzte diesen Versuchsträger als Ausgangsbasis für Entwicklung, Umsetzung und Test einer aktiven piezoelektrischen Stelleinrichtung. Zu den Hauptanforderungen an die Stelleinrichtung zählten der Ausgleich rotatorischer Verlagerungen bei kombinierten Dreh-, Fräs- und Bohrprozessen. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau und die Umsetzung der Stelleinrichtung. Zu sehen sind die drei piezoelektrischen Stellachsen mit ihren externen inkrementellen Wegmesssystemen. Nach der mechanischen und steuerungstechnischen Integration der Stelleinrichtung wurde durch die aktive Regelung eine deutliche Verbesserung der Bearbeitungsgenauigkeit der Versuchsmaschine nachgewiesen (Bild 2). Für die industrielle Anwendung sind jedoch die Kosten einer derartigen Stelleinrichtung entscheidend. In der Stelleinrichtung sind drei Piezowandler und drei inkrementelle Längenmesssysteme angeordnet. Zusätzlich zu den Messsystemen entstehen Kosten für die Ansteuerung der Messsysteme und der piezoelektrischen Wandler. Aufwand und Nutzen stehen deshalb in einem ungünstigen Verhältnis und sprechen in den meisten Fällen gegen eine aktive Kompensation. Analysiert man jedoch die Gesamtkosten, so halten sich die Kosten für die Aktorik inklusive Ansteuerung sowie die Kosten für die Messtechnik inklusive Ansteuerung die Waage.

Um das Kosten-Nutzen-Verhältnis erheblich zu verbessern und die aktive Kompensation einem breiten Anwendungsspektrum zuzuführen, ist es daher das Ziel, die Kosten für die Messtechnik zu eliminieren.

Durch den Wegfall der Messtechnik entsteht aus einem geregelten System ein gesteuertes System. Technisch ist ein gesteuertes Kompensationssystem auf ►►

www.metall-infocenter.de/WB Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern. © 2005 Carl Hanser Verlag, München

Bilder: wbk

►► der Basis von Piezoaktoren beherrschbar. Bei einem Piezoaktor müssen vorher allerdings thermische Drifterscheinungen und das Hystereseverhalten berechnet und ausgeglichen werden. Entsprechende Modelle existieren, gleichwohl verursacht die erforderliche Methodik bei der Ausarbeitung der Modelle und dem Abgleich der Modelle mit einem speziellen piezoelektrischen Aktor einen erheblichen Aufwand. Insgesamt entfallen somit zwar die Kosten für die Messsysteme, dennoch entsteht aus der aktiven Kompensation nicht zwingend ein wirtschaftlicher Vorteil.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Reihenschaltung zweier Piezoaktoren, von denen der eine als Aktor und der

zweite als passiver Sensor genutzt wird. Berücksichtigt man jedoch, dass der Elastizitätsmodul eines passiven Piezosensors nur circa 20 Prozent des Elastizitätsmoduls von Stahl beträgt, so ist bereits aus Steifigkeitsgründen auch damit keine nennenswerte Verbesserung zu erzielen.

Adaptronik ohne Drift- oder Hysteresekompensationen

Neben dem Verzicht auf teure Messsysteme wird deshalb ein System benötigt, das in einem geschlossenen Regelkreis ohne aufwändige Drift- oder Hysteresekompensationen auskommt. Ansätze, die diesem Anforderungsprofil gerecht werden, lassen sich unter dem Schlagwort

»adaptronische Systeme« zusammenfassen. Der Begriff »Adaptronik« lässt sich am einfachsten durch eine Gegenüberstellung eines mechatronischen und eines adaptronischen Systems veranschaulichen: Ein mechatronisches System besteht aus den Komponenten »Aktor«, »Messsystem«, »Regler« und »tragende Struktur«, alle Komponenten sind funktional und räumlich getrennt. Ein adaptronisches System integriert im Gegensatz dazu mindestens zwei der Komponenten funktional und räumlich. Bei einer Sensor-Aktor-Integration werden beispielsweise beide Funktionen von einer einzigen Komponente simultan ausgeführt. Eines der bekanntesten Beispiele für adaptronische Systeme ist ein Brillenglas, das seine Färbung beziehungsweise Lichtdurchlässigkeit an die aktuell vorhandene Helligkeit anpasst. Hier sind Sensor, Regler, tragende Struktur und Aktor funktional und räumlich in einer einzigen Komponente integriert.

Für ein adaptronisches Systems wird in jedem Fall ein multifunktionales Element, beispielsweise ein piezoelektrischer Wandler, benötigt. Die eigentliche Herausforderung liegt aber in der Konzeption der adaptronischen Lösung.

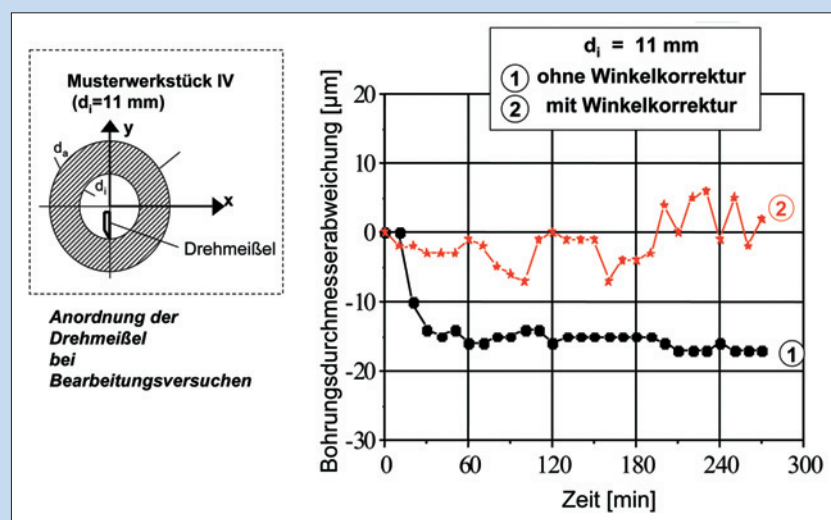
Das Institut für Produktionstechnik (wbk) arbeitet in Zusammenarbeit mit dem Institut für Technische Mechanik (itm) an einem adaptronischen Ansatz, der dem Wunsch nach einer Genauigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen bei angemessenen Kosten nachkommt.

Adaptronische Strebe misst und korrigiert Verlagerungen

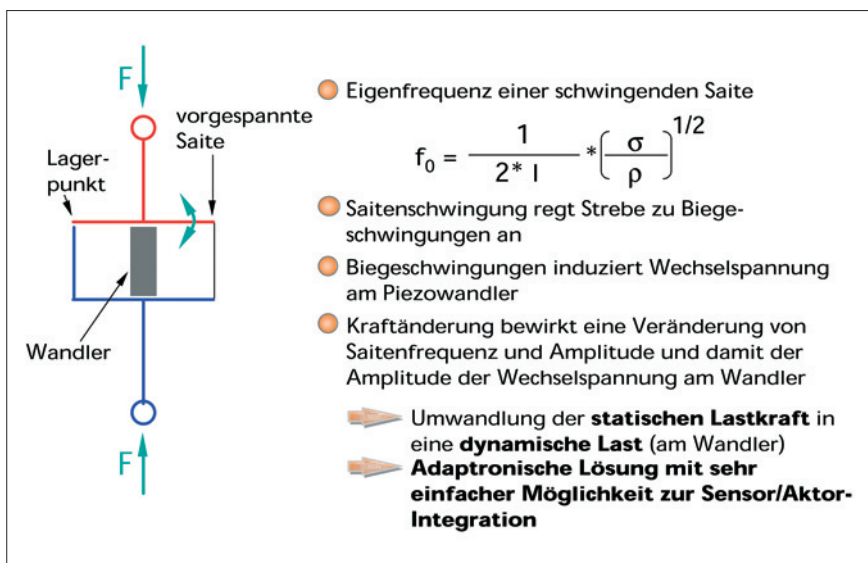
Ziel des Projekts sind der Ausgleich geometrischer Fertigungstoleranzen sowie die adaptronische Steifigkeitssteigerung bei statischen und quasistatischen Kräften. Das adaptronische Konzept wird am Beispiel einer Strebenstruktur für Parallelkinematiken entwickelt und umgesetzt, ist jedoch prinzipiell auf alle anderen Strukturen im Werkzeugmaschinenbau übertragbar. Die Strebe misst einerseits die Lastkraft- beziehungsweise Längenänderung und führt andererseits Korrekturbewegungen aus.

Das für die adaptronische Strebe genutzte Prinzip lässt sich am einfachsten anhand eines Kinderspielzeugs erläutern: Stellt man einen Plastikeimer auf den Boden, befestigt an diesem Eimer einen Besenstiel und spannt ein Gummiband zwischen Eimer und dem oberen Ende des Besenstiels, so kann man durch das Anzupfen des Gummibands Töne erzeugen.

Bearbeitungsgenauigkeit mit aktiver Kompensation



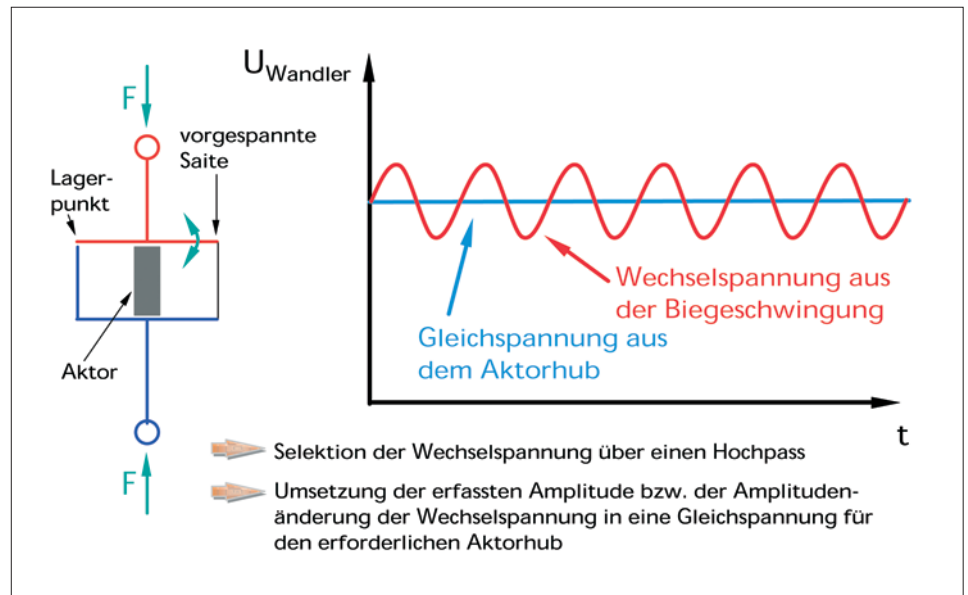
2 Dank aktiver Kompensation realisierte die Stelleinrichtung beispielsweise während der Warmlaufphase eine Verbesserung der Bohrungsgenauigkeit um 10 bis 15 μm



1 Prinzip der adaptronischen Strebe: Die mechanische Struktur aus geteilter Strebe und dazwischen liegendem piezoelektrischem Wandler mit vorgespannter schwingender Saite kann Kräfte beziehungsweise Wege messen und Wege stellen

Die Tonlage ist von der Spannung des Gummibands abhängig und kann beliebig variiert werden. Das gleiche Funktionsprinzip lässt sich auch im technischen Umfeld anwenden. Ein Beispiel dafür sind Schwingsaitenwaagen, die die Frequenzänderung einer gespannten Saite als Maß für eine Kraft- beziehungsweise Längenänderung nutzen.

Dieses Prinzip lässt sich auch für eine adaptronische Strobe nutzen: Dazu wird eine Strobestruktur in zwei gleiche Hälften geteilt, dazwischen ein piezoelektrischer Wandler platziert, über eine Saite vorgespannt und die Saite zu Schwingungen angeregt. Auf diese Weise entsteht eine mechanische Struktur, die gleichzeitig Kräfte und Wege messen sowie Wege stellen kann (Bild 3). Für den Aufbau des adaptronischen Systems werden die speziellen Eigenschaften piezoelektrischer Wandler genutzt. Einerseits erzeugt eine extern auf einen Piezokristall aufgebraachte Last eine Spannung, andererseits lässt sich durch Anlegen einer Spannung eine Längenänderung des Kristalls erzeugen. Innerhalb des adaptronischen Systems regt die Schwingung der Saite die Strobe zu Biegeschwingungen an. Diese Biegeschwingung überträgt sich wieder-



4 Die Integration aktorischer und sensorischer Komponenten führt zu einem adaptronischen System, das Deformationen auf einfache Weise detektieren und ausgleichen kann

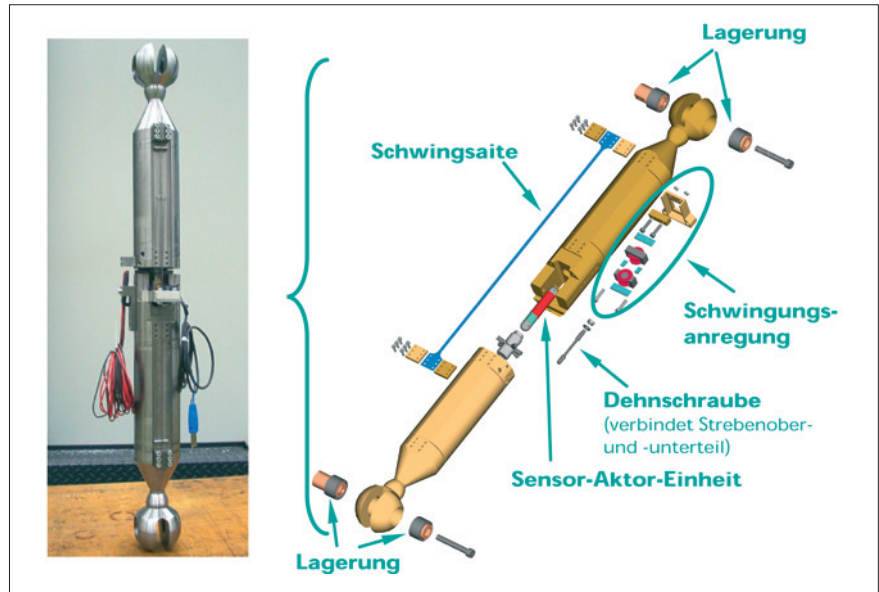
um auf den Piezokristall und erzeugt eine sinusförmige Wechselspannung. Wird die Strobestruktur einer statischen oder quasistatischen externen Last ausgesetzt, so ändert sich die Saitenspannung und damit die Frequenz der Schwingung beziehungsweise der Wechselspannung. Über die Bestimmung der Frequenz der

Wechselspannung ist eine Kraftinformation direkt ableitbar. Zusätzlich lassen sich die aus der externen Last resultierenden Deformationen sehr einfach durch das Anlegen einer Gleichspannung an den Piezokristall ausgleichen. Bild 4 erläutert diese adaptronische Sensor-Aktor-Integration. >>>

►► Aus diesem Prinzip heraus wurde ein Prototyp der adaptronischen Strebe am Institut für Produktionstechnik (wbk) realisiert. Bei den ersten Dimensionierungen zeigte sich, dass für eine ausreichende Kraft- respektive Wegauflösung der Strebe eine möglichst hohe Saitenfrequenz erreicht werden muss. Die rechnerische Frequenz für eine Auflösung von $\pm 0,5 \mu\text{m}$ beträgt bis zu 2000 Hz.

Bisherige Wegauflösung der Strebe beträgt 1 μm

Unter Berücksichtigung einer externen Last von $\pm 2000 \text{ N}$ beziehungsweise einem Stellweg von $\pm 20 \mu\text{m}$ für den Ausgleich von Komponentenfehlern wurde ein Frequenzband von 1500 bis 2500 Hz für den Betrieb der Strebe errechnet. Einerseits zeigt die hohe Betriebsfrequenz klar, dass eine Werkzeugmaschinenstruktur nicht negativ durch die Biegeschwingung der Strebe beeinflusst wird. Andererseits ist aber sofort eine der Herausforderungen des sonst sehr einfach anmutenden Systems zu erkennen: Da die erste Eigenfrequenz einer passiven Strebe deutlich unterhalb von 500 Hz liegt, ist die adaptronische Strebe so zu gestalten, dass trotz der hohen Betriebsfrequenz eine sichere Erfassung der Saitenschwingung durch den Piezosensor gewährleis-

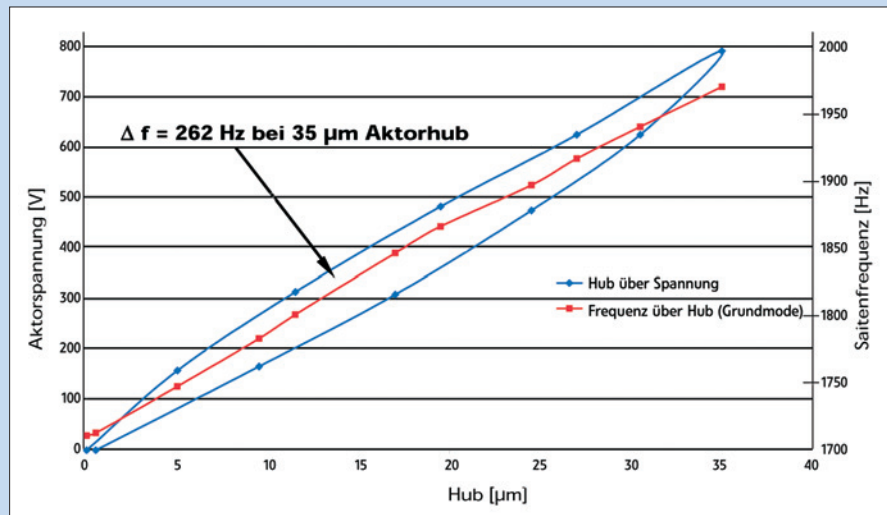


5 Prototyp der adaptronischen Strebe: Die Betriebsfrequenz der Schwingsaite beträgt zwischen 1500 und 2500 Hz; die Kopplung der beiden Strebenteile muss stick-slip-frei und möglichst bei einer Verminderung der Schnittstellenanzahl erfolgen

niert. Die ersten Versuche ergaben eine mittlere Schwingfrequenz der Saite von circa 1850 Hz, die mit dem Piezowandler erfasst werden kann. Über den Gesamthub des Piezowandlers wurde eine Frequenzänderung von etwa 260 Hz ermittelt. Bild 6 zeigt das Betriebsspannungs-Hub- beziehungsweise das Hub-Frequenz-Diagramm des fouriertransformierten Sen-

be besticht durch seine Einfachheit. Es zeigt die prinzipielle Machbarkeit und animiert zur Suche nach weiteren adaptronischen Lösungen für die Produktionstechnik. Die bisherigen Messergebnisse lassen gleichzeitig darauf schließen, dass das Potenzial der Strebenstruktur bei weitem nicht ausgeschöpft ist.

Auswertung des Sensorsignals



6 Die adaptronische Strebe realisiert eine Auflösung von circa 1 μm

tet ist (Bild 5). Im Anschluss wurde das Konzept messtechnisch validiert. Die Sensor- und die Aktorfunktion waren räumlich integriert, aber aus steuerungstechnischen Gründen noch getrennt. Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass die Strebenstruktur prinzipiell funktio-

sorsignals. Die Strebe realisiert mit dem aktuellen Regelungskonzept eine Auflösung von rund 1 μm . Diese Auflösung wird derzeit noch von der Steuerungsprototyping-Hardware und nicht vom Funktionsprinzip der Strebe limitiert.

Das Konzept der adaptronischen Stre-

Potenzial der adaptronischen Strebe längst nicht ausgeschöpft

Die nächsten Schritte bestehen deshalb in der detaillierten Ausarbeitung der Regelungstechnik und der konstruktiven Optimierung der Strebenstruktur. Im Anschluss an die Entwicklung der Regelungstechnik ist der Fokus sukzessive vom statischen beziehungsweise quasistatischen Bereich auf die Kompensation dynamischer Lasten zu erweitern, da nur so die Potenziale der Strebe umfassend ausgeschöpft werden können.

1 Dieter Spath, et. al.: Accomat – Die Genauigkeitsgeregelte Maschine, Abschlussbericht zum BMBF-Leitprojekt Accomat, S.189 ff., 2002, IS-SN1618-2375

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer ist Leiter des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe,

Dipl.-Ing. Christian Munzinger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am selben Institut; munzinger@wbk.uka.de