

Erarbeitung von Dimensionierungsgrundlagen für spielbehaftete Längsstift-Verbindungen

Birkholz, H.; Garzke, M.; Otto, St.

Bereits vor zwei Jahren berichtete das Institut in seiner jährlichen Mitteilungsschrift /1/ über die Möglichkeit, spielbehaftete Längsstifte als Welle-Nabe-Verbindung für die Übertragung hoher Drehmomente einzusetzen und zeigte den hierfür zwingend erforderlichen Forschungsbedarf auf. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes werden nun am Institut Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, deren Ziel im Titel des Artikels zum Ausdruck kommt.

Already two years ago in their annual report /1/ the institute informed about the possibility of using axial pin connections with clearance as shaft-hub-connection for high torque transmission. The required research work was also shown. Now, financed by the German Research Association, basic investigations are undertaken. The aim of this research work is expressed in the title of this article.

1 Stiftverbindungen

Der Terminus Stiftverbindung bezeichnet gewöhnlich formschlüssige Verbindungen, bei denen zu meist übermaßbehaftete Stifte eingesetzt werden, die im Normalfall Kraftgrößen mittels Scherung, Biegung und Flächenpressung übertragen. Die Aufnahmebohrungen werden herkömmlicherweise bei der Montage der Verbindungspartner durch Bohren und Reiben gefertigt. Die Hauptfunktion besteht in der Zentrierung und der Lagesicherung der Bauteile zueinander (**Bild 1**) ohne größere Ansprüche an die Übertragbarkeit von Kräften und Momenten.

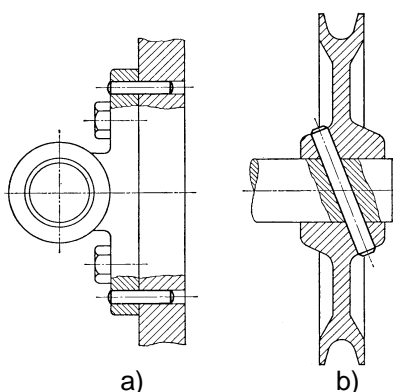


Bild 1: Beispiele für Stifanwendungen /2/; a) Stifte zur Positionierung, b) Nabenbefestigung

In Welle-Nabe-Verbindungen werden Stifte radial, tangential, axial oder diagonal angeordnet. Bei axialer Anordnung in der Paßfuge wird die Bohrung in vormontiertem Zustand gebohrt und gerieben. Dabei besteht die Gefahr, daß – insbesondere bei der Verwendung verschiedener Werkstoffe für Welle und Nabe – die Bohrung verläuft oder die Fertigungsvorgänge Bohren und Reiben die für eine Drehmomentübertragung erforderliche Qualität nicht gewährleisten können /3/. Außerdem muß der Nabensitz für die Herstellung der Bohrung frei zugänglich sein, so daß konstruktive Restriktionen bestehen. Aus diesem Grund begrenzt sich das Einsatzfeld meist auf das Fixieren von Naben, Hebeln oder Stellringen mit Wellen oder Achsen. Die Unvollkommenheiten bei der Fertigung und Montage sind vermutlich auch der Grund für den „schlechten Ruf“ dieser Verbindung und haben dazu geführt, daß bis heute keine wissenschaftlich begründeten Methoden zur Tragfähigkeitsberechnung existieren, die auf die besonderen Eigenschaften der Längsstifte eingehen.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes zu untersuchenden spielbehafteten Längsstift-Verbindungen werden häufig mit dem beschriebenen Montageaufbau und den dargestellten Nachteilen der gepreßten Stiftverbindungen assoziiert; sie unterscheiden sich jedoch grundsätzlich in Aufbau und Funktion.

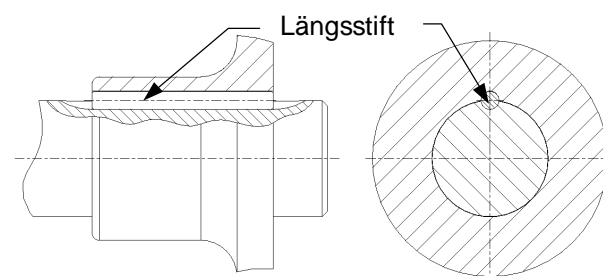


Bild 2: Prinzipieller Aufbau einer spielbehafteten Längsstift-Verbindung

Diese formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung eignet sich zur Übertragung hoher Drehmomente. Dabei werden axial am Umfang der Welle angeordnete, zylindrische Stifte als Mitnehmerelemente verwendet (**Bild 2**). Diese Zylinderstifte können in Anzahl und Anordnung variieren.

2 Vergleich: Längsstift – Paßfeder

Spielbehaftete Längsstifte werden in eine – vor der Montage der Bauteile gefertigte – Nut eingelegt. Die Herstellung der halbkreisförmigen Nut ist mit Hilfe neuer Fertigungstechnologien (z.B. Einwalzen, CNC-Schleifen, Erodieren) mit besserer Fertigungsqualität ausführbar als bei den übermaßbehafteten Stiften (vgl. **Kap. 1**). Zu den erforderlichen Spielen und Toleranzen gibt es bisher keine Aussagen. Die Stifte sind mit hoher Maß- und Oberflächenqualität und im Vergleich zu Paßfedern mit geringeren Kosten herstellbar.

Die spielbehafteten Längsstift-Verbindungen sind durch folgende Vorteile gekennzeichnet:

- leichte Montage/Demontage der Nabe aufgrund des reinen Formschlusses
- Vermeidung zusätzlicher Beanspruchungen, weil kein Verspannen von Welle und Nabe erforderlich ist, und
- Übertragung hoher Drehmomente.

In den genannten Punkten unterscheiden sie sich nicht von der Paßfederverbindung, die nach wie vor in der Antriebstechnik eine der am häufigsten eingesetzten formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen ist und die durch einen hohen Normungsgrad gekennzeichnet ist. Die Paßfederverbindung besitzt jedoch in der hohen Kerbwirkung der scharfkantigen Paßfedernut einen wesentlichen Nachteil gegenüber der Längsstift-Verbindung. Untersuchungen /4/ haben gezeigt, daß in ca. 80% der Schäden an Wellen und Achsen konstruktive Kerben – so auch die Paßfedernut – die schadensauslösenden Stellen sind. **Bild 3** verdeutlicht beispielhaft diese Situation.

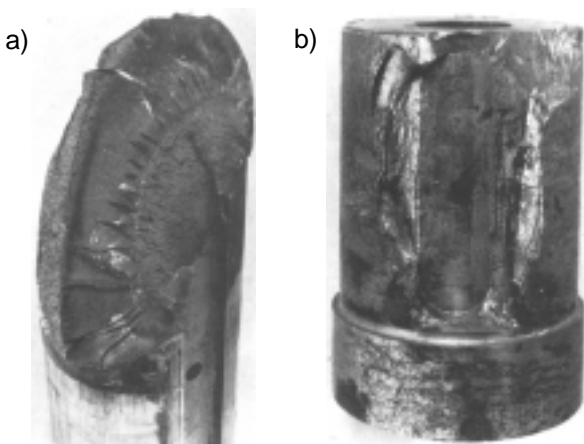


Bild 3: Schadensfälle, bei denen die Paßfeder aufgrund der hohen Kerbwirkung die schadensauslösende Stelle verkörpert /4/; a) Torsionsdauerbruch, b) Ausbrüche

Zur Vermeidung von Schadensfällen werden bei der Dimensionierung von Paßfederverbindungen hohe Form- und Kerbwirkungszahlen berücksichtigt, so daß allein durch Materialanhäufung die Spannung im Übertragungsbereich unterhalb der zulässigen Werkstoffgrenze gehalten wird. Um die maximalen Spannungen im Kerbgrund zu reduzieren, erniedrigt man durch diese Maßnahme die Nennspannungen! Diese Vorgehensweise ist nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Kostenersparnis nachteilig, sondern vor allem hinsichtlich des Zwangs zur Leistungssteigerung eine schlechte Problemlösung. Trotz zahlreich durchgeführter Forschungsvorhaben /5, 6, 7, 8/ bestehen diese Nachteile der Paßfederverbindung weiterhin und werden nur geringfügig durch sorgfältige Ausrundungen des Nutgrundes gemildert.

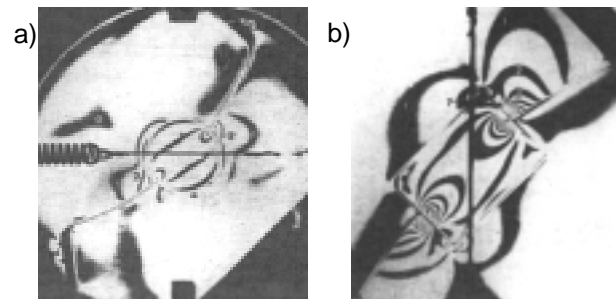


Bild 4: Spannungsoptische Darstellung der Spannungsverteilung in einer a) Längsstift-Verbindung und b) Paßfederverbindung /9/

Längsstift-Verbindungen zeichnen sich aufgrund ihres halbkreisförmigen Nutquerschnitts durch wesentlich geringere Spannungsüberhöhungen in der Kerbe aus. Die spannungsoptischen Bilder, dargestellt in **Bild 4**, verdeutlichen diese Aussage. Während im Modell der Paßfeder Isochromaten¹ der 7. Ordnung auftreten, sind im Modell der Längsstift-Verbindung lediglich Isochromaten der 2. Ordnung zu erkennen. Ihre Tragfähigkeit ist deshalb im Vergleich zu Paßfederverbindungen sehr viel größer, sie erlaubt dadurch eine Reduzierung von Material und Bauraum für die Aufgabe der Drehmomentübertragung. Für die spielbehafteten Längsstift-Verbindungen fehlen aber im Gegensatz zu Paßfederverbindungen abgesicherte Berechnungsvorschriften für eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung. Hinzu kommt der Mangel an Erkenntnissen über die Gestalt- und Dauerfestigkeit von Wellen

¹ Isochromaten zeigen Hauptspannungsdifferenzen an. Sie sind ein indirektes Maß für die Beanspruchungshöhe.

und Naben, die durch eine halbkreisförmige Nut geschwächt sind. Für derartige Geometrien existieren keine Form- und Kerbwirkungszahlen $/10/$.

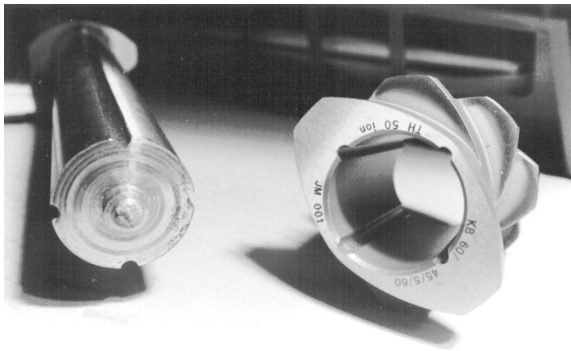


Bild 5: Extruderwelle mit Längsstift-Verbindung $/1/$

Das fehlende Grundlagenwissen über diese Verbindungsart bezüglich Tragfähigkeit und Fertigungsmöglichkeiten ist Ursache dafür, daß der in der Praxis tätige Konstrukteur der spielbehafteten Längsstift-Verbindung – trotz ihrer Vorteile – kein Vertrauen entgegenbringt. **Bild 5** zeigt eines der wenigen Anwendungsbeispiele von Längsstift-Verbindungen, das auch die Wirksamkeit dieser Verbindung mit einer platzsparenden, hochleistungsfähigen Drehmomentübertragung beweist. Weiterhin können gebaute Nockenwellen und Werkzeugmaschinen als Einsatzfelder genannt werden $/1/$, auch die Anwendung in Planetenradgetrieben weist auf Eigenschaften hin, die die hohe Leistungsfähigkeit dieser Verbindung unterstreichen.

3 Ziele des Forschungsprojektes

Das Forschungsprojekt verfolgt die allgemeine Zielstellung, umfassende Berechnungsgrundlagen für

die beanspruchungsgerechte Dimensionierung von spielbehafteten Längsstift-Verbindungen zu erarbeiten und Gestaltungsrichtlinien für deren praktischen Einsatz anzugeben. Damit sollen die Voraussetzungen für eine breite Anwendung dieser bisher unterschätzten Welle-Nabe-Verbindung geschaffen werden.

Der Schwerpunkt der Projektarbeit konzentriert sich zunächst auf die Untersuchung der Einflüsse:

- Geometrie der Verbindungspartner (Welle, Nabe, Stift, Passung),
- Werkstoffe der Verbindungspartner und
- Belastungsart/-kombination

in ihrer Auswirkung auf die Festigkeits- und Tragfähigkeitseigenschaften der Längsstift-Verbindungen.

Bild 6 zeigt die oben genannten Einflußfaktoren und deren detaillierte Aufgliederung in Variationsparameter. Basierend auf Finite-Elemente-Berechnungen werden die genannten Interdependenzen analytisch abgebildet, so daß dem konstruktiv tätigen Ingenieur einfach handhabbare Berechnungsformeln zur Verfügung gestellt werden, die eine optimale Ausführung dieser Welle-Nabe-Verbindung unter funktionellen und belastungstechnischen Gesichtspunkten gewährleisten. Das Dimensionierungsverfahren wird ergänzt durch die Berücksichtigung des Einflusses fertigungs- und montagespezifischer Parameter.

Ein weiteres Ziel der Rechnersimulationen ist die Ermittlung von Formzahldiagrammen. Diese werden sowohl für verschiedene Belastungssituationen als auch Geometrievariationen bestimmt. Sie ermöglichen eine Beurteilung der Kerbspannungen bei statischer Belastung.

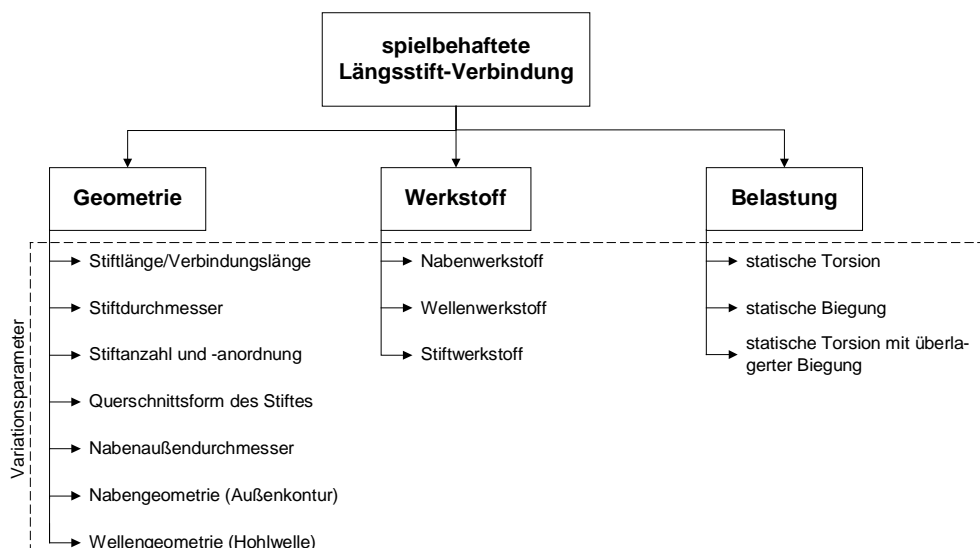


Bild 6: Aufteilung des Projektes in Untersuchungsschwerpunkte

4 Ergebnisse von Voruntersuchungen

4.1 Finite Elemente Berechnungen

Erster Arbeitspunkt im Rahmen der FE-Berechnungen war die Klärung der Randbedingungen für das FE-Modell sowie die Untersuchung des Einflusses der Elementierung auf die Qualität der FEM-Ergebnisse.

Bei den bisher am Institut durchgeführten FE-Analysen an Welle-Nabe-Verbindungen (Zahnwellen-Verbindungen, Preßverbindungen) und Bolzen-Lascheverbindungen handelte es sich stets um Zweikörperkontaktrechnungen. Längsstift-Verbindungen bestehen jedoch aus mindestens drei Kontaktkörpern, von denen sich die spielbehafteten Längsstifte zunächst (am Beginn der Lastaufbringung) radial und tangential frei in der Nut verschieben können. Um eine unkontrollierte Bewegung dieser Kontaktkörper zu vermeiden und letztlich die Konvergenz der numerischen FE-Algorithmen zu ermöglichen, mußten Fesselbedingungen definiert werden, welche die Bewegungsfreiheit der Stifte nicht derart einschränken, daß zusätzliche Spannungen induziert werden.

Zur Lösung dieses Problems wurden basierend auf den Annahmen:

- reine Torsionsbelastung,
- mindestens zwei Stifte am Umfang verteilt und
- gleichmäßige Lastaufteilung auf alle Stifte

mit Hilfe einer im verwendeten FEM-System Marc/Mentat angebotenen Funktion die Freiheitsgrade aller Stiftachsen miteinander gekoppelt. Die-

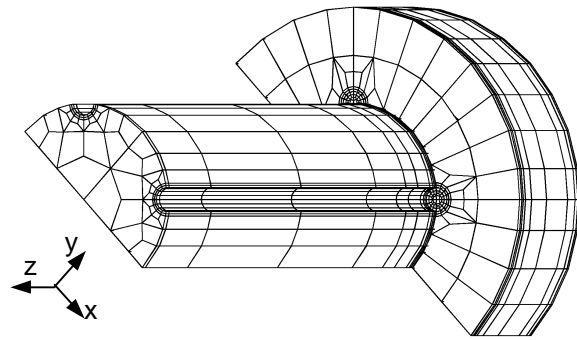


Bild 7: Dreidimensionales 180°-Sektormodell einer Längsstift-Verbindung

se Fesselbedingung in Kombination mit der Fixierung aller Kontaktkörper in z-Richtung (vgl. **Bild 7**) ermöglichte einen fehlerfreien Rechenablauf. Mit dieser Vorgehensweise ergeben sich allerdings folgende Nachteile:

- es müssen mindestens zwei Stifte bei der Berechnung berücksichtigt werden und
- es wird eine gleichmäßige Lastaufteilung auf die Stifte erzwungen.

Unsymmetrische Lastaufteilungen innerhalb der Verbindung, die beispielsweise auch bei der Verwendung mehrerer Paßfedern auftreten, können mit diesen Randbedingungen nicht erfaßt werden.

Für die Voruntersuchungen wurden ausschließlich Halbmodelle verwendet, die neben der Lastsymmetrie (Torsion) auch die Symmetrie der Geometrie (gleichmäßige Stiftverteilung am Umfang) voraussetzen.

Mit den beschriebenen Randbedingungen ist die Untersuchung aller in **Bild 6** gezeigten Einflußpa-

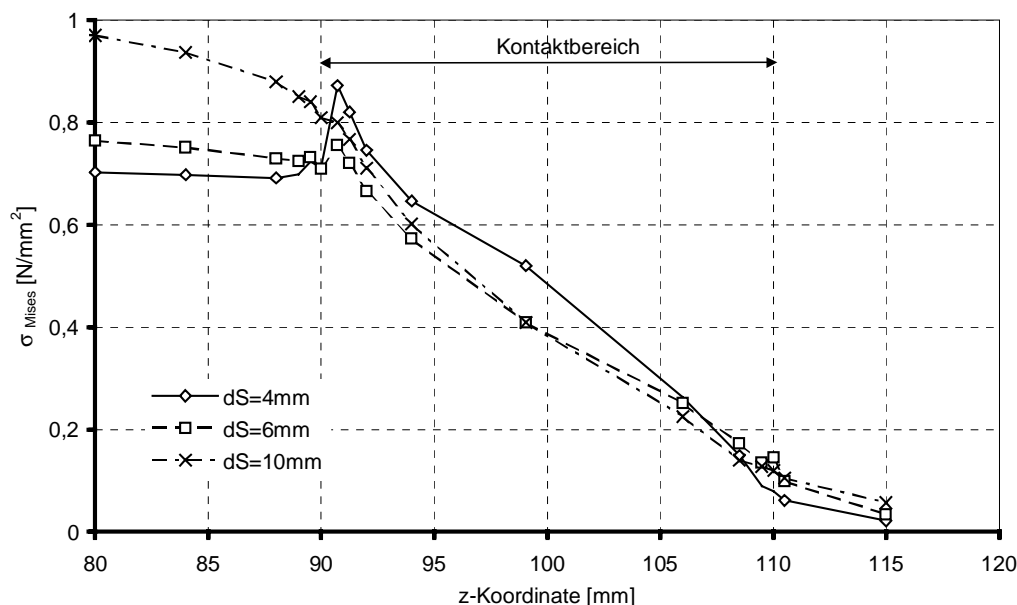


Bild 8: Spannungsverteilung im Kerbgrund der Welle in Abhängigkeit vom Stiftdurchmesser (normiert auf die maximal auftretende Vergleichsspannung der untersuchten Verbindungen) /11/

parameter nicht möglich. Hier werden in den nächsten Arbeitsschritten Verbesserungen erarbeitet.

Neben der Bestimmung von Formzahlen für die Welle und die Nabe wurde auch der Einfluß der Verbindungslänge l , der Stiftanzahl z und des Stiftdurchmessers d_S auf die Spannungsverteilung innerhalb der Verbindung in ersten FEM-Rechnungen analysiert. An Hand des Parameters Stiftdurchmesser d_S werden im folgenden einige Ergebnisse exemplarisch vorgestellt.

Im Rahmen dieser Parameterrechnungen wurden 4-Stift-Verbindungen mit Stiftdurchmessern von 4 mm, 6 mm oder 10 mm untersucht. Dabei wurden die Belastung, der Wellenaußendurchmesser d_W und die Geometrieverhältnisse d_N/d_W und l/d_W (Nabenaußendurchmesser d_N) als konstant vorausgesetzt.

Aus der in **Bild 8** dargestellten Mises-Vergleichsspannung für den Wellenquerschnitt ist zu erkennen, daß sich aufgrund des Steifigkeitssprungs am Beginn der Verbindung ein Spannungspike ausbildet. Der Effekt, welcher sich mit Erhöhung des Stiftdurchmessers einstellt, konnte in seiner mechanischen Auswirkung schon bei Zahnwellen-Verbindungen nachgewiesen werden. Infolge des abnehmenden nutzbaren Wellenquerschnitts steigen die Beanspruchungen außerhalb des Kontaktbereichs an. Gleichzeitig verringert sich die Spannungsspitze am Kontaktbeginn. Im Diagramm wird deutlich, daß – bezogen auf die verwendeten Abmessungen – bei einem Stiftdurchmesser von 6 mm eine optimale Spannungsverteilung erreicht wird, denn die Spannungen vor und im Kontakt sind nahezu identisch.

Im Gegensatz zu den Spannungskonzentrationen am Kontaktbeginn wird der Spannungsabfall über der Verbindungslänge durch diesen Untersuchungsparameter nur geringfügig beeinflusst.

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Der experimentelle Teil der Forschungsarbeiten beschränkt sich zunächst auf die Untersuchung verschiedener Längsstift-Verbindungen unter reiner Torsion. Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung des maximal übertragbaren Drehmomentes unter der Voraussetzung rein elastischer Verformungen und des dabei auftretenden Verdrehwinkels.

Für diese Versuche wurde der in **Bild 9** abgebildete Verspannkasten eingesetzt [12], bei dem die Last-

aufgabe über einen Hebelmechanismus mit angeschlossener Kraftmeßdose erfolgt. Zur Lasteinleitung kann wahlweise eine zu verspannende Rahmenkonstruktion oder eine Zugspindel eingesetzt werden. Letztere findet dann ihre Anwendung, wenn die zu untersuchenden Bauteile extrem torsionssteif sind, so daß die Auswertung der lastabhängigen Verdrehwinkel auf der institutseigenen Koordinatenmeßmaschine erfolgen muß. Die 3D-Meßmaschine ist hinreichend groß, so daß der gesamte Versuchskasten auf dem Arbeitstisch der Meßmaschine montiert werden kann und während des Versuchs geometrische Messungen durchführbar sind. Aufgrund der massiven Kastenbauweise ist der Einfluß der Verspannkastensteifigkeit auf das Meßergebnis äußerst gering.

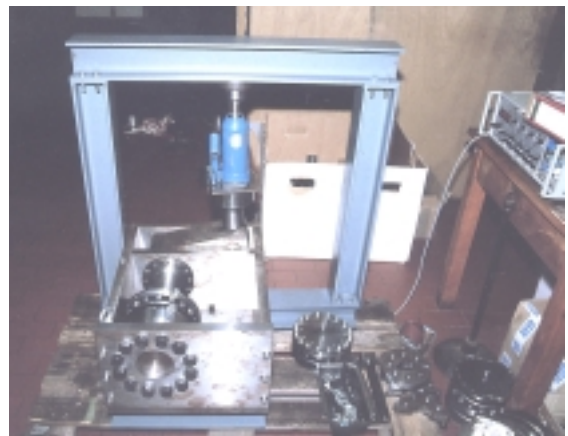


Bild 9: Verspannkasten für statische Torsionsuntersuchungen

Für die Bestimmung des maximal übertragbaren Torsionsmomentes genügt der Einsatz einer handelsüblichen Meßuhr zur Registrierung des Beginns der teilplastischen Bauteilbeanspruchung bzw. des Bruchs oder Durchrutschens der Verbindung bzw. des Bauteils (**Bild 10**).

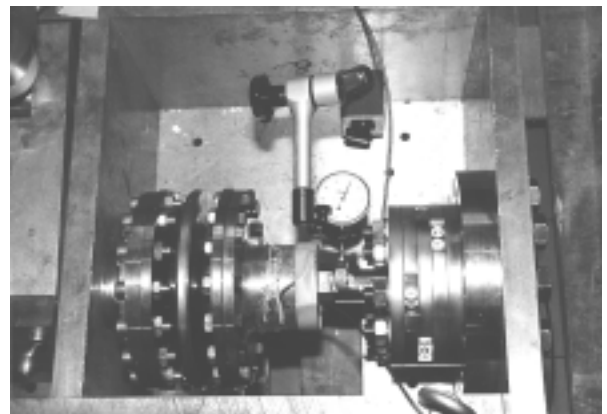


Bild 10: Prüfanordnung mit Meßuhr zur Bestimmung der Deformation

Es wurden Längsstift-Verbindungen mit unterschiedlichen Durchmesserhältnissen d_N/d_W ge-

prüft. Für eine Verbindung mit dünnwandiger Nabe ist die Verformungskennlinie in **Bild 11** exemplarisch dargestellt.

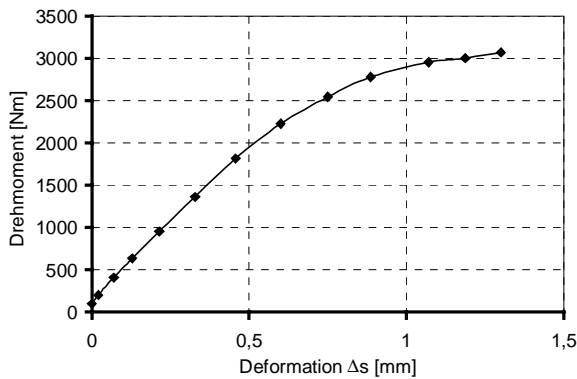


Bild 11: Verformungskennlinie für eine Längsstift-Verbindung mit einem Durchmesser Verhältnis $d_N/d_W = 1,3/13$

Die plastischen Deformationen beginnen in einem Lastbereich zwischen 2000 Nm und 2500 Nm. Erstaunlich war bei den Versuchen, daß das Drehmoment bis auf 3000 Nm gesteigert werden konnte, ohne daß ein Bruch auftrat. Aufgrund der sehr hohen plastischen Deformationen und der Gefahr eines Wellenbruchs wurde der Versuch bei dieser Lasthöhe abgebrochen. Entgegen den Erwartungen zeigte sich somit, daß bei reiner Torsionsbelastung und den gegebenen Geometrie- sowie Werkstoffparametern nicht die Stifte die versagenskritischen Komponenten darstellen sondern die Welle.

5 Zusammenfassung

Die Entwicklung neuer Fertigungstechnologien ermöglicht heute die einfache und preisgünstige Herstellung von Längsstift-Verbindungen. Im Vergleich zu Paßfederverbindungen erzeugt die ausgerundete Längsstiftnut geringere Spannungskonzentrationen, Drehmomente können daher mit vergleichsweise kleineren Abmessungen der Welle-Nabe-Verbindung übertragen werden.

Mit dem hier vorgestellten Forschungsprojekt sollen auf Grundlage theoretischer und experimenteller Untersuchungen standardisierbare Berechnungsgrundlagen erarbeitet werden, die eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung der spielbehafteten Längsstift-Verbindung ermöglichen.

Die vollständige Erforschung einer Welle-Nabe-Verbindung bis zur Angabe von Tragfähigkeits- und Grenzwerten für den in der Praxis tätigen Konstrukteur erfordert jedoch über diese Arbeiten hinaus die Ermittlung der Gestaltfestigkeit und die

Untersuchung anderer Schadensmechanismen (z.B. Reibdauerbeanspruchung). Dies könnten Themenstellungen für ein Folgeprojekt sein.

6 Literatur

- /1/ Burgtorf, U.; Garzke, M.; Schäfer, G.: Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen – eine unterschätzte Welle-Nabe-Verbindung? Institutsmitteilung Nr. 22. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 1997
- /2/ Habenhauer, H.; Bodenstein F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg u.a., 1996
- /3/ N.N.: Stifte und Stiftverbindungen. Merkblatt 451. Beratungsstelle für Stahlanwendung, Düsseldorf, 1982
- /4/ Allianz Versicherungs AG: Handbuch der Schadenverhütung. Allianz Versicherungs AG, Berlin und München, 1979
- /5/ Raab, W.; Weigand, M.; Renneisen, A.: Die Beanspruchung von Paßfederverbindungen – Literaturrecherche und -auswertung. FVA Forschungsheft Nr. 317, Darmstadt, 1990
- /6/ Raab, W.: Paßfederbeanspruchung, FVA Forschungsreport, Darmstadt, 1997
- /7/ Raab, W.: Lebensdauer von Paßfederverbindungen unter besonderen Einsatzbedingungen. FVA Forschungsreport 1998, Frankfurt
- /8/ Linke, H.: Rationeller Tragfähigkeitsnachweis für Getriebewellen nach neuer Vorschrift DIN 743. FVA Forschungsreport 1998, Frankfurt
- /9/ Kuske, A.: Über den Einfluß der Formgebung auf die Spannungsverteilung – Konstruktion und Optimierung von Welle-Nabe-Verbindungen mit spannungsoptischen Versuchen, Verbindungstechnik Heft 4, 1973
- /10/ Kollmann, F. G.: Welle-Nabe-Verbindungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg u.a., 1984
- /11/ Faulwasser, M.: Beanspruchungsverhalten drehmomentbelasteter Längsstift-Verbindungen. unveröffentlichte Studienarbeit, IMW, TU Clausthal, 1998
- /12/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Institutsmitteilung Nr. 23. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 1998
- /13/ Morelos Avila, R.: Trabajo experimental y numerico a la union eje-cubo por medio de varillas cilindricas. unveröffentlichte Diplomarbeit, IMW, TU Clausthal, 1999