

II Kurzfassung

Beitrag zur Auslegung und Konstruktion von Balligzahn-Kupplungen

Die in der Praxis benutzten Berechnungsverfahren zur Auslegung und Konstruktion von Balligzahn-Kupplungen für betriebsgerechte Anwendungen sind zum Teil nicht mehr aktuell und nicht vollständig. Aus diesem Grund ist eine Überarbeitung und Erweiterung mit neuen Erkenntnissen notwendig. Das Ziel dieser Arbeit ist es, verbesserte und neue Ergebnisse zur Auslegung, konstruktiven Gestaltung, zum Einsatz und zur Wirtschaftlichkeit dieser Kupplungen aus Sicht der Hersteller und Anwender zu erhalten.

Bei nationalen und internationalen Behörden (Schiffsklassifikationen, Technische Überwachungsvereine etc.) entsprechen die vorhandenen Bauvorschriften bzw. Richtlinien zur Überprüfung und Auslegung von Balligzahn-Kupplungen nicht vollständig dem Stand der Technik. Unter Nutzung dieser Arbeit könnte eine aktuelle Richtlinie zur Konstruktions-, Herstellungsgenehmigung und Prüfung von Einzel- und Serienkupplungen entstehen.

Die Ergebnisse aus Messungen im Prüflabor und von Prüfständen an speziell hierfür hergestellten Kupplungsteilen, Modellen und Versuchseinrichtungen sind bekanntlich bei deren Nutzung im Entwicklungs- und Konstruktionsstadium nicht grundsätzlich uneingeschränkt anwendbar, weil diese in der Regel aus wirtschaftlichen und ökonomischen Gründen nicht am Objekt selbst bei annähernd realistischen Betriebsbedingungen ermittelt werden können. Deshalb ist hierzu der Beitrag von Expertenwissen von großer Wichtigkeit.

In der vorliegenden Arbeit wird unter Berücksichtigung der vorhandenen wissenschaftlichen und der praxisorientierten Literatur sowie des derzeitigen Standes der Technik ein Beitrag zur Auslegung und Konstruktion von Balligzahn-Kupplungen vorgestellt. Darin sind die Ergebnisse aus vielen experimentellen Forschungsarbeiten und die Erfahrungen aus sehr vielen Industrieanwendungen von Balligzahn-Kupplungen verarbeitet. In diesem Zusammenhang werden außerdem noch besondere Fragen zur Beanspruchung, Belastbarkeit und zum Einsatz von Balligzahn-Kupplungen erörtert. Diese Arbeit liefert somit einen Beitrag zur systematischen, beanspruchungsoptimierten Auslegung von Balligzahn-Kupplungen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Die daraus resultierenden wesentlichen Ergebnisse werden anschließend vorgestellt.

Ein essentieller Bestandteil dieser Arbeit ist ein Berechnungsverfahren zur Festlegung der optimalen Verzahnungsgeometrie für Serien- (Standard-Kupplungen, hochtourige Kupplungen) und Sonderkupplungen entsprechend vorgegebener Anforderungen. Eine Richtlinie zur Festlegung der Verzahnungsparameter, wie dem Eingriffswinkel unter Zuhilfenahme einer Zahnprofilmatrix für verschiedene Eingriffswinkel, sowie neuer empirischer Erkenntnisse zur Ermittlung des Teilkreisdurchmessers, der Berechnung des Moduls und der Zähnezahls unterscheidet zwischen Standard-Kupplungen und hochtourigen Kupplungen. Die Zahnbreite des Balligzahnes wird im Allgemeinen teilkreis- bzw. modulabhängig gewählt. In die Auslegung wird die kinematische Verlagerung der Verzahnung mit einbezogen. Dazu gehört ebenfalls die Überprüfung des Flankenradius bzw. das sich daraus berechnbare Bombierungsverhältnis zur Sicherstellung der geforderten Verzahnungskinematik.

Ein weiterer Punkt der Arbeit ist die Bewertung einer funktionssicheren Zentrierung der Balligzahn-Kupplung im Betrieb. Besonders bei hochtourigen Kupplungen kommt es zur Aufweitung im Verzahnungsbereich infolge der Fliehkräfteinwirkung bei Rota-

tion. Die Berechnung dieser Effekte erlaubt die Beantwortung der Fragen hinsichtlich des Laufverhaltens und der Schwingungsstabilität des Antriebsstranges.

Eine „ideale“ Zahnflankenzentrierung zwischen der außenverzahnten Kupplungsnahe und dem innenverzahnten Kupplungsgehäuse, wie sie überwiegend bei Standard-Kupplungen zum Einsatz kommt, ist nicht erreichbar. Jedoch ist aus Messungen und Erfahrungen bekannt, dass sich bei der Einhaltung einer hier vorgestellten, anwendungsgerechten Kupplungsauslegung und unter Beachtung der Verzahnungsqualität die Zahnflankenzentrierung bei ca. 10 bis 15 % des Nenndrehmomentes bei Betriebsdrehzahl einstellt.

Bei hochtourigen Kupplungen kommt ausnahmslos die Zahnkopfzentrierung zur Anwendung. Mit steigender Drehzahl verändert sich die fertigungsbedingte Zahnkopfzentrierung hervorgerufen durch die Aufweitung in der Verzahnung. Diese berechenbare Aufweitung muss dabei unterhalb eines zulässigen Grenzwertes bleiben. Aus diesen Aufweitungsgrenzwerten lassen sich für diese Kupplungen Grenzdrehzahlen ableiten. Werden diese Grenzwerte überschritten, kann mit speziellen konstruktiven Maßnahmen, wie der Änderung der Masseverteilung und der Verkleinerung des Zahnkopfspieles bis hin zu einer fast spielfreien Einpassung, eine betriebssichere Zahnkopfzentrierung gewährleistet werden.

Je nach Einsatzzweck der Balligzahn-Kupplung ergeben sich ganz spezifische äußere Belastungen an der Kupplung. Diese müssen mit speziellen Anwendungsfaktoren unter Einbeziehung einer Risikobewertung abgeschätzt werden. Nicht immer ist dabei ein komplettes Lastkollektiv für die Lebensdauer der Kupplung vorhanden. Durch die Wahl eines sinnvollen Anwendungsfaktors kann trotzdem ein äquivalentes Antriebsdrehmoment ermittelt werden.

Dieses Antriebsmoment dient zur Bestimmung der vorhandenen Verzahnungsbeanspruchungen in der Kupplungsverzahnung im Zahnfuß und in der Zahnflanke unter Beachtung der Verzahnungsgeometrie. Zur vorrangigen Auslegung oder Kontrolle der Verzahnungstragfähigkeit auf der Zahnflanke oder im Zahnfuß gibt es Entscheidungskriterien, die sich aus den Geometrieparametern der Kupplungsverzahnung und den verwendeten Materialien ableiten lassen. Eine Berechnung der Zahnflankenbelastung ist dabei vorzugsweise bei der Verwendung von legierten und unlegierten Vergütungsstählen mit naturharter Verzahnung notwendig. Die Berechnung der Belastungen im Zahnfuß ist vorrangig bei legierten Stählen mit einer gehärteten Verzahnung notwendig. Eine Reduzierung der Zahnfußstärke aufgrund der Verzahnungsballigkeit für Bombierungsverhältnisse $\varepsilon \geq 1$ bezogen auf die Zahnfußvergleichsspannung kann vernachlässigt werden. Die berechneten Belastungen in der Kupplungsverzahnung werden anschließend mit den zulässigen Materialeigenschaften verglichen. Die daraus ermittelbaren Sicherheiten geben Aufschluss für einen Dauer- bzw. Zeitfestigkeitsbetrieb. In diesem Kontext werden verschiedene Materialien in Verbindung mit oft verwendeten Wärmebehandlungs- und Härteverfahren und den daraus resultierenden Festigkeitskennwerten zusammengefasst.

Ein weiterer Unterpunkt der Arbeit ist die Spezifizierung der Reibwertbereiche nach Anwendung, Einsatz, Bauart, Ausführung, Qualität und Schmierungsart der Balligzahn-Kupplung. Hierbei hat es sich als sinnvoll erwiesen, den gesamten praxisrelevanten Reibwertbereich unter Berücksichtigung der genannten Kriterien in verschiedene Reibwertbereiche aufzuteilen.

Die Berechnung der Axialkraft, des Biegemomentes und der Querkraft auf die Wellen und Lager der gekuppelten Aggregate ist unter Verwendung der Verzahnungskraft und dem Reibwert bei Verlagerung in der Kupplungsverzahnung möglich. Diese Reibkraft, das Reibmoment und die Rückstellkraft führen zu Zusatzbelastungen in den gekuppelten Wellen und den Lagern der gekuppelten Aggregate. Diese Belas-

tungen können als Funktion des Antriebsmomentes bzw. der Verzahnungsbelastungen dargestellt werden. Hinsichtlich der Aufnahme der Axialbelastung kommt dem Festlager eine besondere Bedeutung zu. Dabei wird für eine betriebssichere Auslegung des Axiallagers eine Zusatzbelastung aus der Gesamtreibkraft aller Zähne gewählt und aufgrund der Reibwertstreuung mit einem Sicherheitsauslegungsfaktor gerechnet.

Die Reibung in der Verzahnung ruft bei der betriebsbedingten Verlagerung in der Kupplung eine Reibleistung hervor. Bezogen auf die Antriebsleitung lassen sich damit die Verlust- und Wirkungsgrade einer Zahnreihe bzw. der gesamten Kupplung berechnen. Diese Betrachtungen sind besonders für hochtourige Kupplungen relevant. Um die Gleitgeschwindigkeiten in der Verzahnung aus Gründen der Reibverluste im Zahnkontakt und der thermischen Beanspruchung der Zahnflanke in Grenzen zu halten, sollten solche Kupplungen nur mit geringeren Verlagerungen, d.h. mit Auslenkwinkeln bis maximal $0,25^\circ$, betrieben werden. Die entstehende Wärme aufgrund der Reibleistung wird im Regelfall durch Kühlöl abgeführt. Je nach geforderter Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf der Ölkühlung kann der erforderliche Ölvolumenstrom ermittelt werden. In Abhängigkeit der Konstruktion der Balligzahn-Kupplung weichen diese berechneten Werte von den tatsächlich benötigten Kühlmengen stark ab. Die Ursache liegt im Abschleudern des Öles durch die Fliehkräfte im Betrieb noch vor dem Erreichen der zu kühlenden Verzahnungsbereiche begründet. Die Kenntnis und die Beachtung dieser Schleuderverluste sind für die Ermittlung des Kühlmölvolumenstromes wesentlich. Neben der Berechnung der integralen Verlustleistungen unter Verwendung der mittleren Gleitgeschwindigkeiten im Zahnkontakt muss zusätzlich die spezifische Reibleistung, hervorgerufen durch die Hertz'sche Pressung und der maximalen Gleitgeschwindigkeit im Zahnkontakt, berechnet werden. Diese Belastung ist ein Maß für die örtliche, thermische Beanspruchung der Zahnflanke, wobei analog den mechanischen Belastungen experimentell ermittelten zulässigen Grenzwerte nicht überschritten werden dürfen. Andernfalls drohen irreversible Beschädigungen an der Verzahnung beispielsweise durch Mikroverschweißungen oder Gefügeumbildungen im Material.

Schließlich ist die Entwicklung von Kupplungsbaureihen bis hin zur fertigungsreifen Konstruktion mit sehr geringem technischem Aufwand durchführbar. Die dafür notwendige Stufung zwischen den Kupplungsgrößen erfolgt nach der dezimalgeometrischen Normzahlreihe R10. Für feiner abgestufte Baureihen kann die Normzahlreihe R20 hinzu gezogen werden. Dabei ändern sich die Kupplungshauptabmessungen, die Längen und Durchmesser, mit dem Stufensprung in der ersten Potenz, die Kupplungsmasse, das Kupplungsdauermoment und die Torsionssteifigkeit mit dem Stufensprung in der dritten Potenz und das Massenträgheitsmoment mit dem Stufensprung in der fünften Potenz von Baugröße zu Baugröße. Somit ist es möglich mit einem Grundentwurf auf Kupplungshauptdaten beliebiger Baugrößen einer Baureihe zu schließen. Im Allgemeinen ist es dabei vorteilhaft, wenn der Grundentwurf etwa im Mittelfeld der zu konzipierenden Baureihe liegt.

Die Methode zur anwendungssicheren Auslegung und Konstruktion von Balligzahn-Kupplungen ist im Anhang in einem Formel- und Logikflussplan dokumentiert. Daraus lassen sich entsprechende Rechenprogramme ableiten.