

Elastisch-plastische Auslegung der Pressverbände zwischen Rotorwelle und Blechpaket von hochdrehenden E-Maschinen zur Steigerung der Leistungsdichte

Mit der fortschreitenden Steigerung der Leistungsdichte hochdrehender elektrischer Maschinen rückt die mechanische Tragfähigkeit von Pressverbänden zwischen Rotorwelle und Rotorblechpaket zunehmend in den Fokus der Auslegung. Insbesondere bei hohen Drehzahlen führen Fliehkräfte zu einer signifikanten Reduktion der übertragbaren Drehmomente. Während konventionelle Auslegungsansätze überwiegend auf einer elastischen Betrachtung basieren, bietet eine elastisch-plastische Auslegung das Potenzial zur Steigerung der Drehmomentübertragbarkeit durch höhere Übermaße. Die damit verbundenen Verformungen der Blechpaketgeometrie, die Veränderung der Reib- und Kontaktbedingungen sowie deren Einfluss auf die Übertragbarkeit waren jedoch bislang nicht hinreichend untersucht und in bestehenden Auslegungsmodellen nicht systematisch berücksichtigt.



Abbildung 1: Vergleich stanzpaketiertes (links) vs. verbackenes Blechpaket (rechts) in Pressverbänden mit hohem Übermaß

Ziel des Forschungsvorhabens waren experimentelle und numerische Untersuchungen elastisch-plastisch beanspruchter Pressverbände mit Blechpaketen bei hohen Übermaßen. Dabei sollten Gestaltungsgrenzen identifiziert, Reib- und Kontaktmechanismen analysiert sowie der Einfluss von Blechpaketstruktur, Übermaß und Betriebsdrehzahl systematisch erfasst werden. Auf dieser Grundlage wurde ein Leitfaden zur mechanischen Auslegung von Pressverbindungen mit Blechpaketen entwickelt, der eine belastbare Dimensionierung unter Berücksichtigung realer Kontakt- und Betriebsbedingungen ermöglicht.

Zur Untersuchung der elastisch-plastischen Auslegung von Pressverbindungen mit Blechpaketen wurde ein kombinierter analytischer, experimenteller und numerischer Ansatz verfolgt. Auf Grundlage experimentell bestimmter Grenzdrehmomente bei unterschiedlichen Übermaßen sowie axialer Fügekraftverläufe wurden zunächst

Reibwerte mittels rein elastischer Berechnungen nach DIN 7190 ermittelt. Parallel dazu wurden elastisch-plastische Finite-Elemente-Modelle aufgebaut, deren Reibparameter durch Abgleich numerischer und experimenteller Füge- und Belastungskurven kalibriert wurden.

Die Validierung der Modelle erfolgte über den Vergleich berechneter und gemessener Verformungszustände nach dem Fügevorgang sowie über den Abgleich numerisch erfasster Fliehkräfteeffekte mit experimentellen Ergebnissen bei hohen Drehzahlen. Abweichungen zwischen Modellannahmen und realem Reib- und Verformungsverhalten wurden durch mikroskopische und optische Untersuchungen der Kontaktflächen analysiert.

Die Optimierung der Wellengeometrie wurde numerisch untersucht, während der Einfluss der zyklischen Vorbeanspruchung ausschließlich experimentell bewertet wurde. Die Auslegungsempfehlungen wurden auf Grundlage der experimentellen Kennwerte, der validierten numerischen Modelle sowie der systematischen Variation von Übermaß, Blechpaketstruktur und Betriebsdrehzahl abgeleitet.

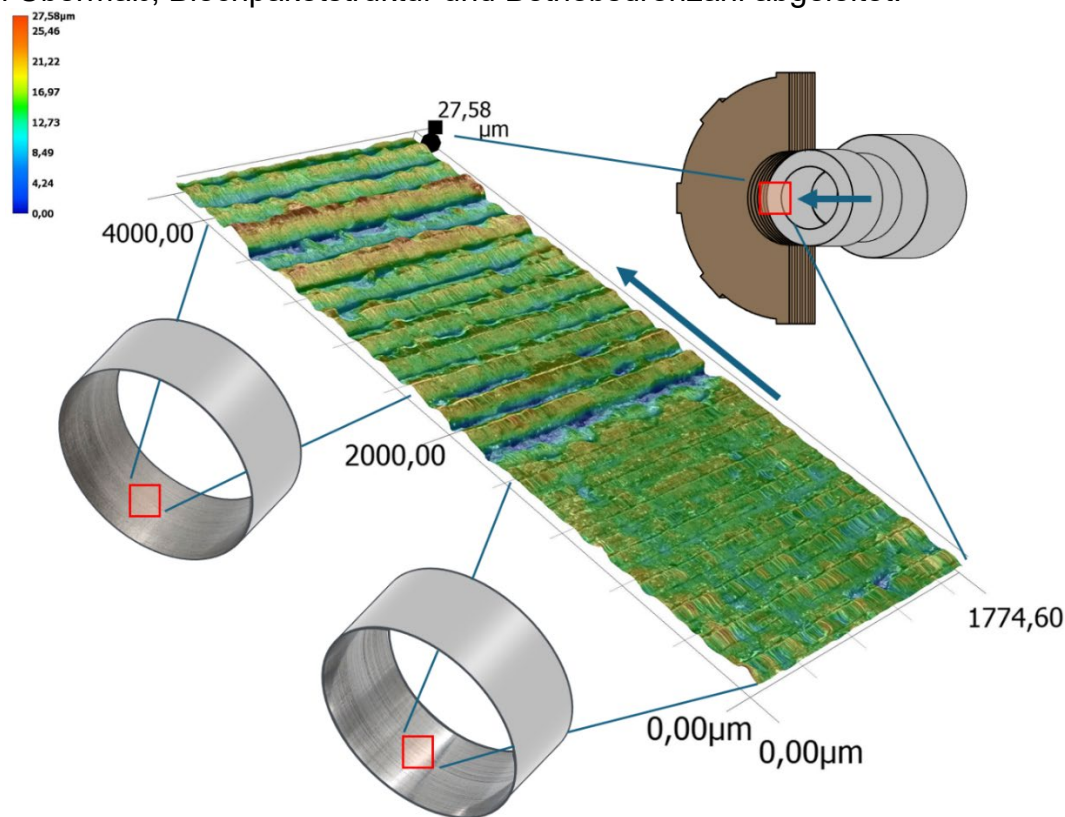


Abbildung 2: Oberflächentopographie und plastische Glättung der Innenoberfläche der Blechpakete beim Fügen

Die experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigen, dass die Struktur des Blechpakets einen maßgeblichen Einfluss auf die zulässigen Übermaße und die Tragfähigkeit von Pressverbindungen besitzt. Verbackene Blechpakete ermöglichen Übermaße bis zu $\xi = 7 \text{ ‰}$ (bezogen auf den Fügedurchmesser) und erlauben damit eine Steigerung der übertragbaren Drehmomente bis zum 2,5-Fachen gegenüber der rein elastischen Auslegungsgrenze von $\xi = 1,9 \text{ ‰}$. Stanzpaketierte Blechpakete hingegen neigen bei hohen Übermaßen infolge der geringen axialen Verbundfestigkeit

der Einzelbleche zu Delaminationen und axialen Aufwölbungen, was zu einer reduzierten Tragfähigkeit führt (Abbildung 1).

Im Rahmen des Vorhabens wurden Modellreibungswerte für den Fügevorgang sowie für die Drehmomentübertragung experimentell bestimmt und in numerischen Modellen validiert. Der Einfluss des Übermaßes auf das Reibverhalten und die Reibwerte ist größer als der Einfluss der Schmierstoffart. Trocken gefügte Verbindungen weisen bei gleichem Übermaß höhere Rutschdrehmomente und eine stabilere Drehmomentübertragbarkeit auf. Abweichungen zwischen modellierten und realen Reibverhältnissen lassen sich durch die während des Fügevorgangs auftretende plastische Glättung der Stanzgrate, die Reduktion des wirksamen Übermaßes sowie die Vergrößerung des effektiven Traganteils der Kontaktflächen erklären (Abbildung 2).

Die Untersuchungen unter Betriebsdrehzahl zeigen, dass die Drehmomentübertragbarkeit unter Berücksichtigung der Fliehkräfte realitätsnah numerisch beschrieben werden kann. Während bei der elastischen Auslegungsgrenze von $\xi = 1,9 \text{ ‰}$ Drehmomentverluste von bis zu 35 % auftreten, reduziert sich dieser Wert bei hohen Übermaßen bis zu $\xi = 7 \text{ ‰}$ auf etwa 15 %. Eine zyklische Vorbeanspruchung (Trainieren) unterhalb der Schlupfgrenze führt zusätzlich zu einer Erhöhung des Grenzdrehmoments um bis zu 15 %. Ursache hierfür ist eine Anpassung der Kontaktverhältnisse, bei der Schmierstoffanteile teilweise aus den tragenden Kontaktflächen verdrängt werden und sich die wirksame Reibung erhöht.

Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Optimierung von Wellenfasenlänge und -radius die Fugendruckverteilung verbessert und die Drehmomenttragfähigkeit gegenüber einer nach DIN 7190 ausgeführten Standardfase um bis zu 10 % gesteigert werden kann.

Die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Ergebnisse wurden in einen strukturierten Leitfaden zur mechanischen Auslegung von Pressverbänden mit Blechpaketen überführt. Dieser ermöglicht eine systematische Auswahl geeigneter Blechpaketstrukturen, zulässiger Übermaße und Reibparameter unter Berücksichtigung von Betriebsdrehzahl und Fliehkrafteinfluss.

Der Leitfaden enthält empfohlene Parameterbereiche für unterschiedliche Auslegungsziele sowie eine Entscheidungslogik zur Bewertung von Tragfähigkeit, Drehmomentverlusten und geometrischen Randbedingungen. Damit wird eine ausfallsichere Dimensionierung auch im elastisch-plastischen Bereich ermöglicht und die Ausnutzung hoher Übermaße zur Steigerung der Drehmomenttragfähigkeit gezielt nutzbar gemacht.

Die Ergebnisse sind auf Pressverbände mit Blechpaketen allgemein übertragbar und unterstützen Unternehmen bei der Entwicklung leistungsdichter und betriebssicherer Welle-Nabe-Verbindungen.

Autoren: **Emre Baris Yildiz, M.Sc.**

Institut für Konstruktionstechnik und technisches Design – Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Marko Ebermann

Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik – TU Chemnitz

Kontakt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA)

Dirk Arnold

T 069- 6603 -1632

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben IGF-Nr. 01|F22386 N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit den Mitteln der [IGF](#) gefördert.

Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)

Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) ist ein europaweit einzigartiges, themenoffenes und vorwettbewerbliches Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE), das kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) einen einfachen Zugang zu praxisorientierter Forschung und zu aktuellen Forschungsergebnissen ermöglicht. In der IGF bestimmen Unternehmen bzw. Verbände, Forschungsvereinigungen und Forschungseinrichtungen gemeinsam den Forschungsbedarf und die Forschungsthemen ihrer Branche. Die Begleitung der Forschungsprojekte durch die Unternehmen garantiert die Praxisnähe der Forschungsprojekte. Die Ergebnisse der IGF-Projekte sind öffentlich und stehen allen interessierten Unternehmen zu gleichen Bedingungen zur Verfügung. So stärkt die IGF die Wettbewerbsfähigkeit des Mittelstands in Deutschland und trägt damit maßgeblich zu Deutschlands Innovationssouveränität bei.

Die FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.) ist das weltweit erfolgreichste und größte Forschungs- und Innovationsnetzwerk in der Antriebstechnik. Zusammen mit rund 180 Unternehmen und 100 Forschungsinstituten haben wir bisher weit über 2.000 Projekte realisiert. Die Antriebstechnik voranzubringen – das ist das Ziel der FVA. Dazu bringen wir Industrie und Forschung zusammen. Dies zu moderieren, neues Wissen zu erforschen, Effizienz und Erkenntnisse zu schaffen – das macht uns zum Innovationsförderer unsere Branche. Für unsere Mitglieder bedeutet das einen mehrfachen Return-on-Invest: Austausch und Kenntnistransfer in der FVA-Community, Mitgestaltung an der Forschung, Teilhabe an neuestem Wissen, Ausbildung von jungen Ingenieur*innen, passgenaue Weiterbildung, Reduzierung von F+E Kosten. Das kommt unseren Mitgliedsunternehmen, dem Forschungsstandort Deutschland und allen Beteiligten Menschen zu Gute. Denn unsere vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung, finanziert über die IGF und Eigenmittel ist etwas ganz Besonderes. Gemeinsam geht einfach mehr. Dafür bündeln wir Ressourcen, auch finanzielle, moderieren Kommunikation und Prozesse. Wir helfen, Ideen zu verwirklichen. Weitere Informationen unter www.fva-net.de.