



9 Ausblick

Die Gestaltfestigkeit evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen ist ein großes und komplexes Themengebiet. Zwar sind durch die mit dieser Dissertation veröffentlichten Ergebnisse, Erkenntnisse und Entwicklungen zahlreiche Fragestellungen beantwortet. Allerdings existieren weiterführende technische Sachverhalte, die wissenschaftliche Klärung erfordern. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden diese im Nachfolgenden dargelegt.

9.1 Torsionsmomentbezogen

9.1.1 Gültigkeitsnachweis der Ergebnisextrapolation

Essenzielles Arbeitsergebnis dieser Dissertation ist die mathematische Beschreibung aller für das Kriterium der wellenbezogenen Gestaltfestigkeit optimalen Geometrieparameter evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 sowie der ihre Gestaltfestigkeit charakterisierenden Kenngrößen. Die entwickelten Näherungsgleichungen basieren auf umfangreichen numerisch durchgeführten Parameteranalysen. Hierbei wurde unter anderem der Bezugsdurchmesser d_B im Intervall $6\text{ mm} \leq d_B \leq 500\text{ mm}$ sowie der Flankenwinkel α im Intervall $20^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ untersucht. Damit sind die entsprechend entwickelten Gleichungen zunächst in ihrem Gültigkeitsbereich auf die zuvor benannten Intervalle zu begrenzen. Mit Verweis auf die Gleichungen (222) sowie (238) wird jedoch prognostiziert, dass eine zuverlässige Vorhersage des optimalen Moduls m_{Opt} sowie des optimalen Wellenfußrundungsradiusverhältnisses $(\rho_{f1}/m)_{Opt}$, zumindest weit über den zur Ergebnisgenerierung zugrunde gelegten Analysebereich hinweg, gegeben ist. Zudem wird davon ausgegangen, dass die für jene Parameter ohne Optimum ausgesprochenen konstruktiven Empfehlungen jenseits der oben benannten Grenzen noch zutreffend sind. Sofern das vorherig Beschriebene gültig ist, wären die optimalen Verbindungen evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 zumindest in guter Näherung allgemeingültig bekannt. Für die ihre Gestaltfestigkeit charakterisierenden Kenngrößen jedoch sind Einschränkungen zu treffen. So ist hierbei zunächst die Gültigkeit der zur mathematischen Beschreibung der Torsionsformzahl $\alpha_{ktGEHdB}$ beziehungsweise $\alpha_{ktGEHdh1}$ auf Flankenwinkel α im Intervall $20^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ zu begrenzen. Dies entspricht allerdings bereits einem weitgefassten technischen Bereich. Innerhalb dieses Intervalls ist, mit Verweis auf den Effekt der geometrischen Ähnlichkeit, vgl. Kapitel 6.2.3.3, die Torsionsformzahl $\alpha_{ktGEHdB}$ beziehungsweise $\alpha_{ktGEHdh1}$ der jeweils extrapoliert optimalen Verbindung genau dann bekannt, wenn ihre Zähnezahlen z im Intervall $24 \leq z \leq 32$ und darüber hinaus ihre Initiationsprofilverschiebungsfaktoren x_f im Intervall $-0,05 \leq x_{f1} \leq 0,45$ beziehungsweise $0,05 \geq x_{f2} \geq -0,45$ liegen. Zuletzt benannte Bedingung ist bei evolventisch basierten

Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 allerdings per Definition immer erfüllt. Für das bezogene Spannungsgefälle G_{GEH} hingegen wurde festgehalten, dass dieses für Bezugsdurchmesser d_B größer als 500 mm bekannt ist. Für Bezugsdurchmesser d_B kleiner als 6 mm hingegen wird keine Aussage getroffen. Die zuvor beschriebenen Prognosen sind zu überprüfen. Hierfür bieten sich Extremwertbetrachtungen an.

9.1.2 Nabenbezogene Optimierung und Tragfähigkeitsquantifizierung

Als System von Welle und Nabe ist das Versagen einer evolventisch basierten Zahnwellenverbindung eine Frage des schwächeren Verbindungspartners. Bei steifen Naben gemäß Abbildung 6.1 ist dies, selbstredend in Abhängigkeit der gewählten Werkstoffe, oftmals die Welle. Dies begründet, dass der Fokus dieser Dissertation auf der geometrischen Optimierung sowie weiterführend der optimabezogenen Gestaltfestigkeitsquantifizierung dieses Verbindungspartners liegt. Und trotzdem befähigt das durch die in diesem Zusammenhang durchgeführten numerischen Analysen gewonnene Systemverständnis in Kombination mit der allgemeinen Kerbtheorie dazu, Prognosen zur optimalen Wahl der geometriebestimmenden Parameter der Nabe, also für Nabenfußrundungsradiusverhältnis ρ_{fz}/m sowie Nabenformübermaßsverhältnis c_{fz}/m , zu treffen. Diese sind zu überprüfen und, sofern diese denn nicht mit hinreichender Genauigkeit zutreffen, anzupassen. Darüber hinaus sind die Optima zu quantifizieren, so dass eine nabenbezogene Gestaltfestigkeitsbeurteilung möglich ist. Dies ist Grundvoraussetzung dafür, dass eine Verbindungsauslegung erfolgen kann. Ist hierfür doch das kritische Bauteil zu bestimmen. Es sei angemerkt, dass der kritische Querschnitt entgegen der universitär allgemein behandelten Vorgehensweise zur Bauteilauslegung nicht ermittelt werden muss. Dieser ist implizit in der Torsionsformzahl α_{kt} enthalten.

9.1.3 Einfluss der Profilmodifizierung

Mit dem im Rahmen dieser Dissertation in Kapitel 3.2 entwickelten sowie in Kapitel 3.3 dargelegten System zur Profilerzeugung evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen wurde unter anderem die Funktion der Profilmodifizierung eingeführt. Für die Gestaltfestigkeit derartiger Verbindungen ist diese von besonderer Bedeutung. Sie wurde in diesem Werk jedoch nur bei einem Bezugsdurchmesser d_B von 25 mm analysiert, dies teils zudem lediglich im Sinne einer Extremwertanalyse. Liegt doch der Anspruch dieser Dissertation hierbei im Aufzeigen des Optimierungspotenzials sowie weiterführend einem Profilformvergleich zwischen der im Forschungsvorhaben [FVA 742 I] für einen Hülldurchmesser von 25 mm als optimal ausgewiesenen komplexen Trochoiden M – T046, z18 und ihrer quasi geometrieäquivalenten evolventisch basierten Zahnwellenverbindung nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.39. Nichtsdesto-

trotz ist, sofern der Effekt der geometrischen Ähnlichkeit bei profilmodifizierten Verbindungen nunmehr in erweiterter Definition, vgl. Gleichung (218), Gültigkeit hat, die Gestaltfestigkeit weiter Bereiche derartiger Verbindungen quantifiziert. Hieraus resultiert zunächst die Forderung nach einer entsprechenden Überprüfung. Unabhängig von der Gültigkeit der geometrischen Ähnlichkeit für profilmodifizierte Verbindungen wird die Weiterführung der im Rahmen dieser Dissertation angewendeten praxisorientierten Vorgehensweisen zur Bestimmung und mathematischen Beschreibung der gestaltungsfestigkeitsbezogenen Optima sowie darüber hinaus ihrer die Gestaltfestigkeit charakterisierenden Kenngrößen von evolventisch basierten Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 empfohlen.

Als Folge ihrer Funktionsweise hat die Profilmodifizierung Einfluss auf das Verschleißverhalten evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3. In Konsequenz kann zur Bewertung der Verschleißfestigkeit profilmodifizierter Verbindungen nicht auf vorhandenes Wissen zurückgegriffen werden. Dieses ist in Gänze zu erarbeiten.

Abschließend sei angemerkt, dass dem geneigten Anwender mit dem vom Autor dieser Dissertation in Kapitel 3.2 entwickelten und in Kapitel 3.3 dargelegten System zur Profilgenerierung evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen zusätzlich zur Profilmodifizierung weitere neue Funktionen zur Verfügung stehen. Die Einflüsse der sie steuernden Parameter sind ebenfalls zu bestimmen. Hierbei sind der Bezugsdurchmesserabstand A_{dB} sowie die wirksame Berührungshöhe $h_w (R_{hw} = 0)$ zu benennen.

9.1.4 Ersatzdurchmesser d_h nach [Naka 51]

Nach dem Stand der Technik wurden bis zu jenem Zeitpunkt vor der Veröffentlichung dieser Dissertation in der Regel die Ersatzdurchmesser d_h nach [Naka 51] zur Gestaltfestigkeitscharakterisierung evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen zugrunde gelegt. Zumindest wellenbezogen birgt dies jedoch Risiken beim Ableiten wissenschaftlicher Aussagen. Demzufolge wurden sie hierbei im Rahmen dieser Dissertation nur noch sekundär berücksichtigt. Über das zuvor Benannte hinaus ist ihre Handhabung zudem mit erhöhtem Aufwand verbunden. So ist zu überprüfen, ob die Erhaltung der Ersatzdurchmesser d_h nach [Naka 51] sinnvoll ist. Sofern dies der Fall ist, ist, mit Verweis auf das mit dieser Dissertation nunmehr zur Verfügung stehende System zur Profilgenerierung evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3, ihre Allgemeingültigkeit zu überprüfen beziehungsweise durch die Anpassung ihrer mathematischen Formulierung herzustellen.

9.1.5 Formulierung sowie Einflussbestimmung der Nabensteifigkeit

Für diese Dissertation wurden evolventisch basierte Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 mit steifer Nabe gemäß Abbildung 6.1 analysiert. Unter anderem durch [Mont 15] ist jedoch bekannt, dass sich eine weiche Nabe erwartungsgemäß günstig auf die Gestaltfestigkeit von Zahnwellenverbindungen auswirkt. Hierbei kann festgehalten werden, dass dieser Effekt bei Torsion sehr gering, bei Biegung hingegen relativ stark ausgeprägt ist. In Konsequenz wird seine Erforschung mit dem Ziel seiner laststartabhängigen mathematischen Formulierung für Formzahl α_k und bezogenes Spannungsgefälle G' vorgeschlagen, so dass er in leichter Zugänglichkeit technisch genutzt werden kann.

Der Einfluss der Nabenbreite b sowie der Nabenrestwandstärke auf die gestaltfestigkeitsrelevante Lokalbeanspruchung wurde bereits häufig analysiert, dies allerdings unabhängig voneinander. Der geometrische Anteil der Nabensteifigkeit ist aber immer ein Zusammenspiel dieser Größen. Hieraus resultierend ist vor der Bestimmung des Einflusses der Nabensteifigkeit dessen korrekte mathematische Beschreibung Grundvoraussetzung. Mit Verweis auf Kapitel 9.1.1 kann in diesem Zusammenhang die Weiterführung der Ersatzdurchmesser d_h nach [Naka 51] beziehungsweise deren Weiterentwicklung sinnvoll sein.

9.1.6 Bestimmung weiterführender geometrischer Einflüsse

Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Dissertation war die sogenannte Grundform evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3. Ihrer in Kapitel 6.1 angeführten Definition kann entnommen werden, dass diese lediglich die Paarung einer endlos verzahnten Welle mit ihrer zugehörigen Nabe gemäß den dort beschriebenen Eigenschaften umfasst. Weitere geometrische Besonderheiten weist diese nicht auf. Über das zuvor Benannte hinaus wurden in Kapitel 7 weiterführende Optimierungen vorgenommen. Die hier angeführten konstruktiven Empfehlungen beziehen sich zum Teil auf geometrische Tragfähigkeitseinflüsse jenseits der Grundform. Grundlage hierfür sind Ergebnisse experimentell durchgeführter Stichversuche an evolventisch basierten Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] des Forschungsvorhabens [FVA 467 II]. Auf Basis dieser Daten sind allerdings lediglich qualitative Aussagen zum Einfluss der analysierten Sachverhalte möglich. Hieraus resultiert die Empfehlung zur systematisch optimabezogenen Bestimmung weiterführender mutmaßlich praxisrelevanter geometrischer Einflüsse auf die Gestaltfestigkeit evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 und deren mathematische Beschreibung. In diesem Zusammenhang sind unter anderem die Auslauform und damit verbunden die Nabenlage, die Nabenfase, die Flankenlinienkorrektur sowie die Sicherungsringnut zu benennen.

9.1.7 Gestaltfestigkeitssteigerung durch Einsatzhärten

Unter anderem im Forschungsvorhaben [FVA 467 II] zeigte sich für einsatzgehärtete evolventisch basierte Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480], dass der Anriss bei inhomogenen Beanspruchungen seinen Ausgangspunkt im Bauteilinneren haben kann. Dieser Effekt wird auf entsprechende Relation des Gradienten der mit der Werkstoffhärte korrelierenden Werkstofffestigkeit sowie jenes der Beanspruchung zurückgeführt. Auslegungstechnisch bedeutet dies, dass die Sicherheit im Inneren geringer ist als jene an der Oberfläche. Dieser Sachverhalt kann dazu genutzt werden, um einer kerbbedingten Lokalbeanspruchung mit einer harten Randschicht entsprechender Einhärtungstiefe zu begegnen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist hierbei der Zusammenhang zwischen der entsprechenden Tiefe und der mit ihr realisierbaren Tragfähigkeitssteigerung bei gegebener Kerbschärfe zu klären. Dabei sei aber darauf hingewiesen, dass ihr Nutzen zur Gestaltfestigkeitssteigerung vom Beanspruchungsgradienten abhängt. Durch die Ergebnisse dieser Dissertation wurde dieser allerdings signifikant verringert, so dass der durch das Einsatzhärten zu erwartende Gestaltfestigkeitszugewinn als gering eingeschätzt wird. Hierbei ist jedoch hervorzuheben, dass sich die thermochemische Behandlung der Oberfläche erfahrungsgemäß äußerst günstig auf die Verschleißfestigkeit auswirkt.

9.2 Biegemomentbezogen

Mit den Ergebnissen, Erkenntnissen und Entwicklungen dieser Dissertation sind aus Sicht der Gestaltfestigkeit für Torsion die optimalen beziehungsweise günstigen geometriebestimmenden Parameter evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 sowie deren Tragfähigkeit bekannt. Allerdings sind derartige Verbindungen oftmals nicht nur mit einem quasi statischen Torsionsmoment M_t , sondern zudem mit einem dynamischen Biegemoment M_b belastet. Dieses hat häufig parasitären Charakter und kann beispielsweise bei statisch unbestimmter Konstruktionsweise aus dem Achsversatz zwischen Welle und Nabe oder aber den Besonderheiten eines Kreuzgelenks, vgl. leistungsloses Biegemoment M_b , resultieren. In Konsequenz ist eine weiterführende Klärung seines Einflusses quasi unabdingbar. In diesem Zusammenhang wird zunächst empfohlen zu überprüfen, ob das Biegemoment M_b Einfluss auf die optimalen beziehungsweise günstigen geometriebestimmenden Parameter evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 nimmt. Im Anschluss kann seine optimabezogene Einflussbestimmung auf die Gestaltfestigkeit erfolgen. Hierbei sind die Biegeformzahl $\alpha_{kbGEHdB}$ beziehungsweise $\alpha_{kbGEHdh1}$ sowie das bezogene Spannungsgefälle G'_{GEH} zu bestimmen und mathematisch durch Näherungsgleichungen zu beschreiben. Dabei wird empfohlen, die Erforschung des Einflusses des Biegemomentes M_b nicht auf evolventisch basierte Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 gemäß Tabelle 6.1 zu begrenzen, sondern diese allgemeingültig durchzuführen. Damit ist folglich das in Kapitel

9.1 für Torsion Festgehaltene auch für Biegung von Relevanz. Abschließend wird darauf hingewiesen, dass bei der Bestimmung des Einflusses des Biegemomentes M_b auf die Tragfähigkeit evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen zwischen einer Analyse ohne und einer mit sichergestellter Zentrierwirkung zu differenzieren ist. Für weitere Informationen zu diesem Sachverhalt sei auf [WSW 16] verwiesen.

9.3 Mehrfachbelastungsbezogen

In [FVA 700 I] ist aufgezeigt, dass die Bestimmung der Tragfähigkeit von Bauteilen mit komplexer Kerbsituation nach [DIN 743] unter Verwendung von mit der Gestaltänderungsenergiehypothese bestimmten kerbcharakterisierenden Kennwerten genau dann einem relativ großen Fehler unterliegt, wenn mehr als eine Belastungsart dynamisch vorherrscht. Verschärfend kommt hinzu, dass die Bauteiltragfähigkeit dann überschätzt wird, die Auslegung also unsicher ist. Die im Rahmen dieser Dissertation bestimmten Torsionsformzahlen $\alpha_{ktGEHdB}$ beziehungsweise $\alpha_{ktGEHdh1}$ sind, wie dem Index entnommen werden kann, auf Basis der Gestaltänderungsenergiehypothese bestimmt. Mit Verweis auf das in [FVA 700 I] Festgestellte, ist deren Verwendung für die Bestimmung der Tragfähigkeit evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3 mit der [DIN 743] also auf jene Lastfälle zu beschränken, bei denen maximal eine dynamische Lastart induziert wird. Mit dem Hintergrundwissen, dass das Torsionsmoment M_t für derartige Verbindungen nahezu ausschließlich nicht als dynamisch anzunehmen und damit Bestandteil der Mittellast ist sowie darüber hinaus die Kerbwirkung in entsprechend benannter Norm ausschließlich bei dynamischen Belastungen berücksichtigt wird, stellt sich anwendungsspezifisch in aller Regel nicht das Problem einer dynamischen Mehrfachbelastung. So ist die weiterführende Bestimmung des Biegemomenteinflusses auf die Gestaltfestigkeit evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach Kapitel 3.3, vgl. Kapitel 9.2, für die meisten Anwendungsfälle derartiger Verbindungen hinreichend. Trotzdem kann es sinnvoll sein, komplexere Belastungssituationen analytisch abbilden zu können. Hierfür sind entsprechende wissenschaftliche Maßnahmen erforderlich.

9.4 Überarbeitung der [DIN 5466]

Wie in Kapitel 2.4.2 mit Verweis auf Kapitel 2.4.3 dargelegt, wurde die [DIN 5466] im Gegensatz zur [DIN 743] explizit zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen entwickelt. Obwohl es sich bei beiden Normen um Nennspannungskonzepte handelt, gibt es grundlegende systematische Unterschiede. So basiert die [DIN 743] rein auf den äußeren Belastungen und, sofern mehrere Lasten in die Verbindung eingeleitet werden, ihrer abschließenden Zusammenführung zur Bewertung der Bauteilsicherheit S . Die [DIN 5466] hingegen ist grundlegend auf Basis ihrer durch die äußeren Belastungen induzierten Beanspruchungskomponenten definiert.

Ihr gegenwärtig großer Vorteil gegenüber der [DIN 743] ist, dass weiterführende Gestaltfestigkeitseinflüsse wie beispielsweise jene von Nabenbreite b und Nabenrestwandstärke, Verzahnungsungenauigkeiten unterschiedlicher Art etc. berücksichtigt werden können. Gegenwärtig bestehen allerdings Unsicherheiten bei der Bewertung der Gestaltfestigkeit evolventisch basierter Zahnwellenverbindungen nach [DIN 5480] auf Basis der [DIN 5466]. Dies ist Begründung dafür, dass ihr hierfür zwingend erforderlicher Teil 2 zurückgezogen und in Konsequenz die entsprechende Norm für derartige Aufgabenstellungen nicht verwendbar ist. Das Ziel zur Erhaltung der [DIN 5466] vorausgesetzt, leitet sich aus dem zuvor dargelegten Problem zunächst die Forderung nach ihrer Korrektur ab. Mit Verweis auf die systematischen Unterschiede zur [DIN 743] erfolgt jenseits des zuvor Benannten die Berücksichtigung der Spannungsüberhöhung nicht nach der in Kapitel 2.2.1.3 definierten Formzahl α_k . Damit sind die hierbei in dieser Dissertation erarbeiteten Ergebnisse zunächst nicht nutzbar. Im Zuge dessen wird im Rahmen der ohnehin erforderlichen Überarbeitung der [DIN 5466] zur Berechnung der Gestaltfestigkeit von Zahn- und Keilwellenverbindungen empfohlen zu erörtern, ob eine verfahrenstechnische Anpassung sinnvoll ist, so dass konventionell bestimmte Formzahlen α_k , und so eben auch jene dieser Dissertation, verwendbar sind. Selbstredend können auch dann die auf die Tragfähigkeit einflussnehmenden Größen durch Korrekturwerte bestimmt, mathematisch beschrieben und demzufolge korrigiert werden. In diesem Zusammenhang wird es als sinnvoll erachtet, die Zahnwellenverbindungen in ihrer Grundform als Basis zu berechnen und die jeweiligen Einflüsse durch entsprechende Korrekturwerte zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise wurde im vorliegenden Werk verfolgt.