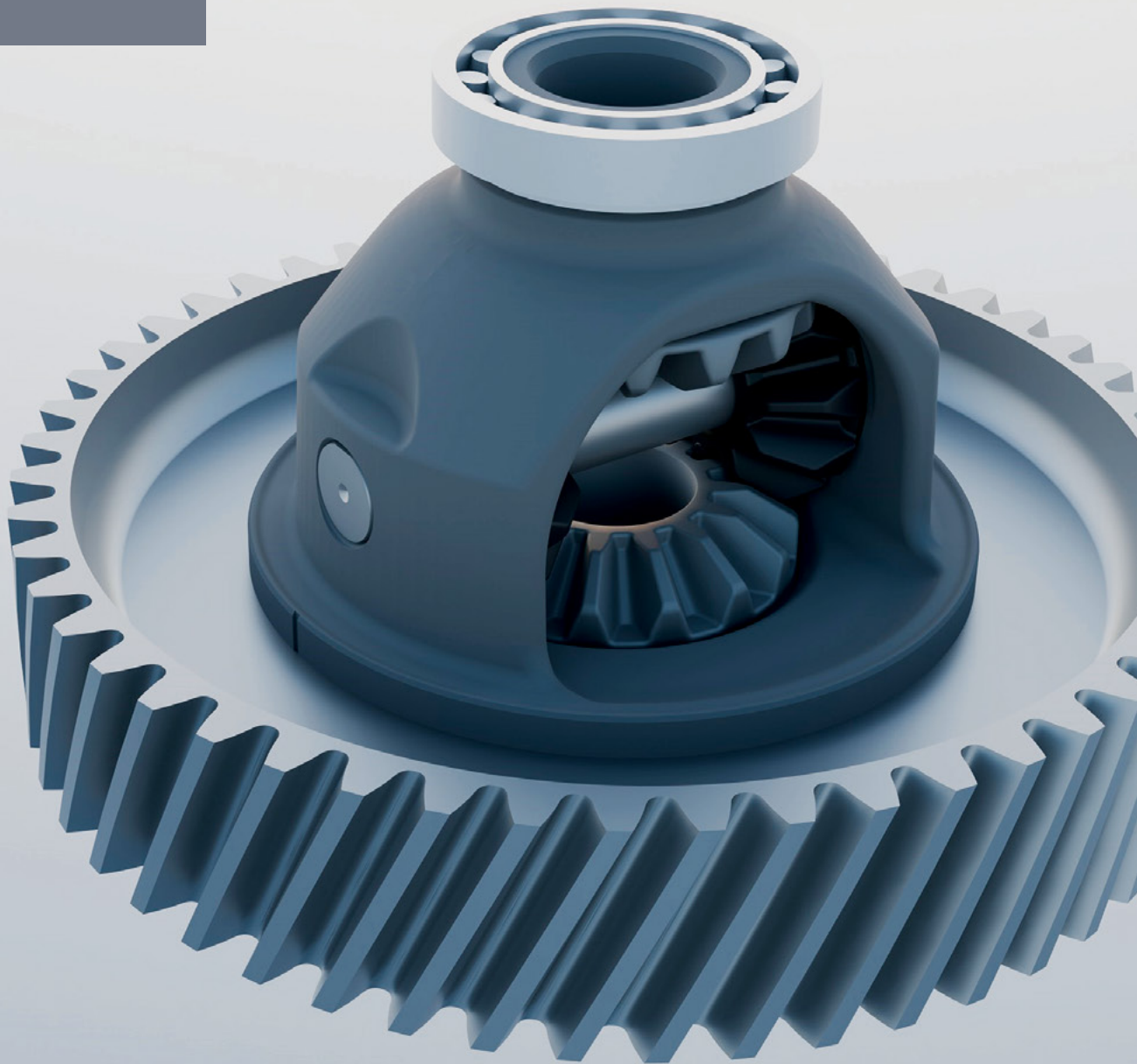


MTZ extra

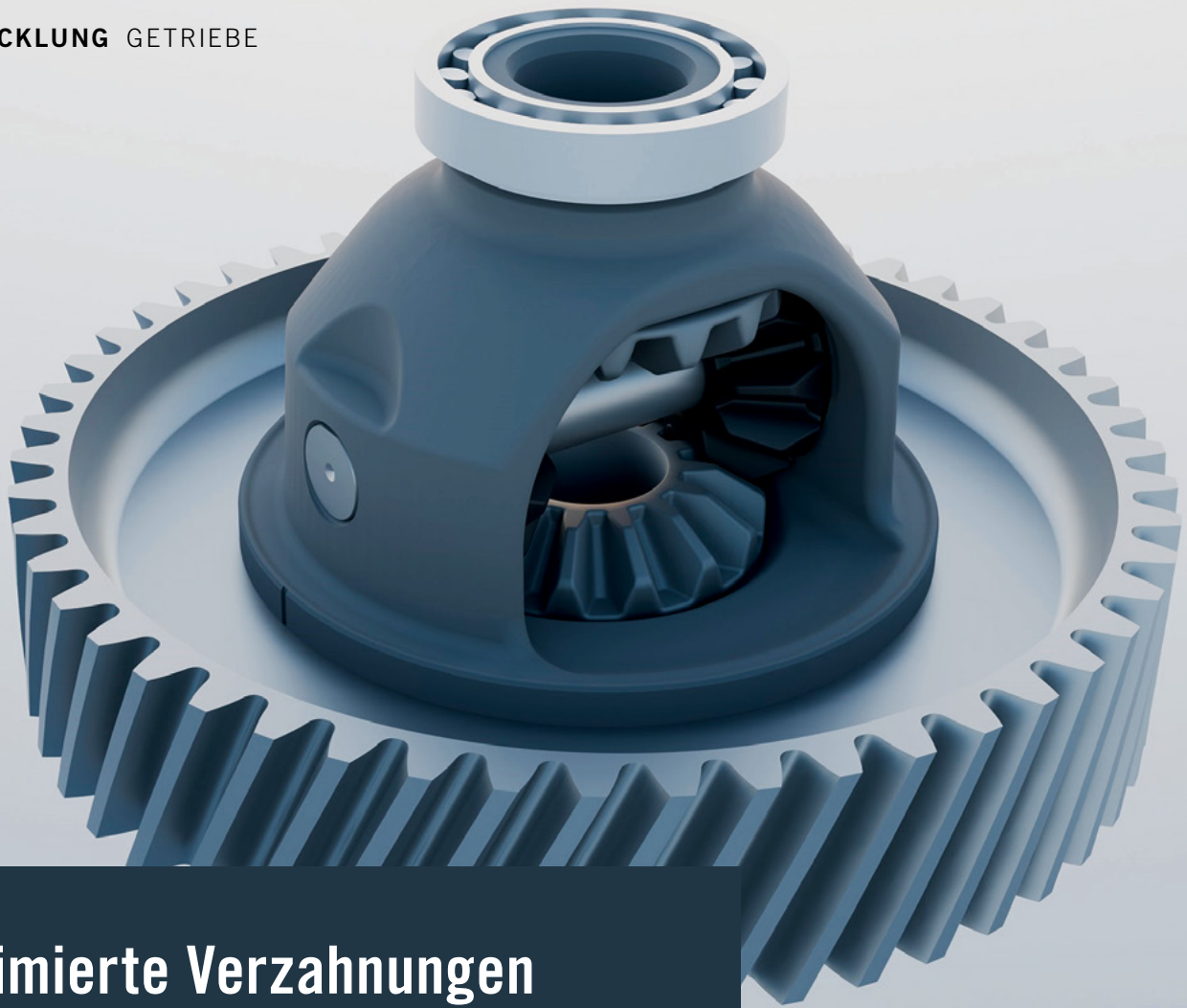


GETRIEBE

**Optimierung der
Verzahnungen bei
elektrischen Achsantrieben**



**Hirschvogel
Group**



© Hirschvogel

Optimierte Verzahnungen für höchste Performance

Elektrische Antriebsstränge stellen aufgrund der Kombination aus hohen Drehzahlen, begrenztem Bauraum, Schmierbedingungen und strengen NVH-Vorgaben hohe Anforderungen an die moderne Getriebeentwicklung. Um diese zu erfüllen, nutzt Hirschvogel eine ganzheitliche und systemorientierte Auslegungsstrategie der verzahnten Getriebekomponenten. Im Gegensatz zu konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotor treten dabei neben der klassischen Festigkeitsbetrachtung insbesondere der Wirkungsgrad und akustische Eigenschaften in den Vordergrund.

■ Durch die intelligente Kombination aus gezielter Geometrieoptimierung und modernen Fertigungstechnologien können in der Getriebeentwicklung die typischen Zielkonflikte zwischen Effizienz, Festigkeit und Geräuschverhalten signifikant reduziert werden. Eine sys-

temorientierte Vorgehensweise, die die Wechselwirkungen zwischen Verzahnung, Lagerung und Radkörper einbezieht, eröffnet neue Freiheitsgrade in der Verzahnungsentwicklung und steigert die Leistungsfähigkeit elektrischer Achsantriebe nachhaltig.

Mit einem neuen Prozess zur Entwicklung verzahnter Bauteile nutzt die Hirschvogel Group gezielt die Potenziale umgeformter Komponenten, um die Leistungsfähigkeit der Antriebsstränge zu steigern [1]. Dabei werden die einzelnen Komponenten nicht nur

VERFASST VON



Dr.-Ing. Uwe A. Rütjes
ist Produktmanager bei der
Hirschvogel Umformtechnik
GmbH in Denklingen.

isoliert betrachtet, sondern deren Wechselwirkungen im Gesamtsystem analysiert und optimiert. Im Folgenden werden exemplarisch ausgewählte Zusammenhänge bei der Auslegung verschiedener Getriebekomponenten aufgezeigt und Lösungsvorschläge dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf der letzten Übersetzungsstufe eines Reduktionsgetriebes, da diese in Bezug auf Wirkungsgrad, Verschleiß und Geräuschverhalten besonders kritisch ist.

GESTALTOPTIMIERTE BAUTEILE FÜR EINEN BESSEREN WIRKUNGSGRAD

Der Wirkungsgrad des mechanischen Antriebssystems gewinnt zunehmend an Bedeutung, da er die Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen maßgeblich beeinflusst. Bereits geringe prozentuale Verbesserungen im Systemwirkungsgrad können sich deutlich auf die praktisch nutzbare Reichweite auswirken. Parallel dazu spielt das Geräuschverhalten eine zunehmend wichtige Rolle in der Kundenwahrnehmung. Die fehlende akustische Maskierung durch den Motor führt dazu, dass Geräusche, die bei konventionellen Antrieben nicht wahrgenommen würden, bei E-Fahrzeugen als störend empfunden werden können.

Diese Rahmenbedingungen führen zu einer komplexen Wechselwirkung zwischen Wirkungsgrad, mechanischer Festigkeit und NVH-Verhalten (Noise, Vibration, Harshness). Jede Veränderung an der Verzahnungsgeometrie beeinflusst alle drei Aspekte simultan, häufig jedoch in gegensätzlicher Richtung. So können Maßnahmen zur Verbesserung der Festigkeit den Wirkungsgrad verschlechtern oder das Geräuschverhalten negativ beeinflussen.

Neben den klassischen Festigkeitsnachweisen für die Oberflächenfestigkeit (Pitting) und die Dauerbruchfestigkeit (Zahnfußfestigkeit) müssen bei hochbelasteten Zahnrädern zusätzliche Beanspruchungen berücksichtigt werden. Moderne Getriebe arbeiten unter extremen Lasten, was eine besonders sorgfältige Auslegung erfordert. Die letzte Übersetzungsstufe eines Reduktionsgetriebes ist zudem durch erhöhten Verschleiß infolge hoher Drehmomente und durch einen stark begrenzten Bauraum gekennzeichnet, was die konstruktive Gestaltung zusätzlich erschwert.

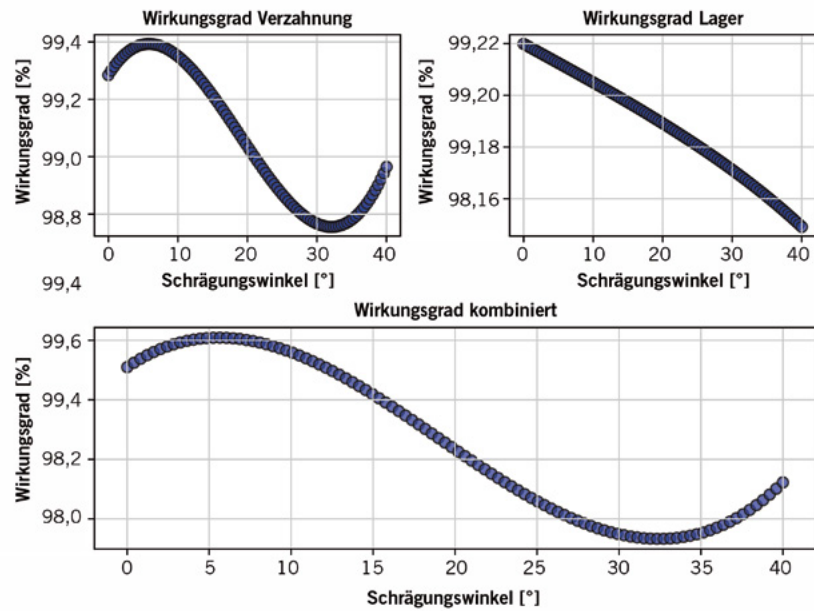


BILD 1 Einfluss einer Verzahnungsauslegung auf den Wirkungsgrad (© Hirschvogel)

Für die Betrachtung eines Systems wird die Verzahnung der letzten Übersetzungsstufe eines Reduktionsgetriebes mitsamt den Lagern betrachtet. Die Analyse kombiniert also die Betrachtung von Verzahnung und Lagerung. In parametrischen Studien wurden Schrägungswinkel (β) und Verzahnungsgeometrien variiert, während der Bauraum konstant blieb. Die Festigkeitsnachweise orientierten sich an ISO 6336 und umfassten die Pittingtragfähigkeit, die Zahnfußfestigkeit (Dauerbruch) und den Flankenbruch. Darüber hinaus wurde der Wirkungsgrad sowohl lokal für die Verzahnung als auch im Gesamtsystem inklusive Lagerung berechnet. In BILD 1 sind die Zusammenhänge zwischen Verzahnung und Wirkungsgrad dargestellt.

BILD 1 (oben links) zeigt beispielhaft den Einfluss des Schrägungswinkels auf den Wirkungsgrad einer Verzahnung. Bei dieser Betrachtung wurde der Schrägungswinkel variiert, während Eingriffswinkel, Zähnezahl und Achsabstand konstant gehalten wurden. Es ist erkennbar, dass der Wirkungsgrad der Verzahnung vom Schrägungswinkel abhängig ist. Grund sind die Relativgeschwindigkeiten auf der Zahnflanke und damit verbunden die Reibung.

In BILD 1 (oben rechts) ist der Wirkungsgrad der Lager über die Variation des Schrägungswinkels der Verzahnung dargestellt. Durch die Änderung des Schrägungswinkels ändern sich auch

die Axialkräfte auf die Lager, die wiederum den Wirkungsgrad beeinflussen. Kombiniert man beide Betrachtungen, BILD 1 (unten), zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrads von der Verzahnungsauslegung.

In modernen Bauteilauslegungen wird der Schrägungswinkel einer Verzahnung typischerweise erhöht, um die Sprungüberdeckung zu vergrößern und die Tragfähigkeit zu verbessern. Dies hat jedoch wie dargestellt einen negativen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad. Für dieses Beispiel zeigt sich ein Minimum im Wirkungsgrad zwischen $\beta = 30^\circ$ und $\beta = 35^\circ$.

Diese einfache Betrachtung veranschaulicht den Zielkonflikt. Die Auslegung einer Verzahnung muss bereits zahlreiche Randbedingungen berücksichtigen, und die Betrachtung weiterer Kenngrößen beeinträchtigt die Ergebnisse erheblich. Zur Analyse der verschiedenen Verzahnungsparameter wurde eine umfassende Variationsrechnung durchgeführt, wobei der verfügbare Bauraum unverändert blieb. In TABELLE 1 sind exemplarisch die Ergebnisse für drei ausgewählte Bauteile aufgeführt, die die Auswirkungen der Parameteränderungen verdeutlichen.

Verzahnung 1 dient als Referenzvariante, die auf maximale Festigkeit hin optimiert wurde, ohne Rücksicht auf den Wirkungsgrad oder andere Kenn-

größen. Alle ihre Kennwerte sind zur besseren Vergleichbarkeit auf 100 % normiert. Diese Variante repräsentiert einen Ansatz der Getriebeauslegung, bei dem die Tragfähigkeit das dominierende Kriterium darstellt.

Verzahnung 2 wurde hingegen so konzipiert, dass ein optimaler Kompromiss zwischen Verzahnungswirkungsgrad und Pittingsicherheit erreicht wird. Bei dieser Variante stand die Effizienz der Verzahnung selbst im Vordergrund, während die Wechselwirkungen mit den Lagern noch nicht explizit berücksichtigt wurden. Dies entspricht einem ersten Schritt in Richtung einer wirkungsgradorientierten Auslegung.

Verzahnung 3 schließlich ist eine Variante mit Fokus auf Pittingsicherheit und Gesamtwirkungsgrad des Systems, einschließlich der Lager. Diese Variante berücksichtigt explizit die Wechselwirkungen zwischen Verzahnung und Lagerung und repräsentiert somit den hier vorgestellten systemischen Optimierungsansatz.

Für die Verzahnung 2 konnte der Verzahnungswirkungsgrad verbessert werden, während sich die Pittingsicherheit rechnerisch leicht verschlechtert hat. Die Fußsicherheit jedoch hat sich deutlich verschlechtert. Unterm Strich hat sich der Gesamtwirkungsgrad des Systems mit Lagern durch den verbesserten Verzahnungswirkungsgrad deutlich verbessert.

Im nächsten Schritt wurde die Bewertung von der alleinigen Betrachtung des Verzahnungswirkungsgrads auf die Beurteilung des Gesamtwirkungsgrads zusammen mit der Pittingsicherheit ausgeweitet. Dadurch wurde eine Variante ausgewählt, bei der der Verzahnungswirkungsgrad zwar immer noch besser als in der Grundvariante ist, der Gesamtwirkungsgrad sich aber um 5 % verbessert hat. In Bezug auf die wirkungsgradoptimierte Variante konnten sowohl die Pittingsicherheit als auch die Fußsicherheit noch einmal verbessert werden. Dieses überraschende Ergebnis unterstreicht die erheblichen Vorteile einer systemischen Betrachtung. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Fußsicherheit im Vergleich zur Grundvariante noch immer um etwa 10 % geringer ist.

Eine bereits seit Langem diskutierte optimierte Fußgeometrie, wie von Brömsen vorgeschlagen [2], kann Entlastung

	Verzahnung 1	Verzahnung 2	Verzahnung 3
Fußsicherheit	100,00 %	88,93 %	90,61 %
Pittingsicherheit	100,00 %	97,93 %	99,57 %
Wirkungsgrad Verzahnung	100,00 %	100,13 %	100,08 %
Wirkungsgrad Gesamt	100,00 %	103,27 %	105,29 %

TABELLE 1 Vergleich der Zahnradauslegungen (© Hirschvogel)

bieten. Eine schematische Darstellung dieser optimierten Geometrie ist in **BILD 2** zu sehen. Durch die Optimierung der Fußgeometrie können die Spannungen in der realen Anwendung um bis zu 20 bis 30 % reduziert werden. Beobachtungen zeigen sogar, dass diese Optimierungen die Reduktion der Fußsicherheit überkompensieren können. Diese Möglichkeiten werden bereits seit Langem erfolgreich bei anderen Verzahnungstypen eingesetzt [3].

Dank neuer Fertigungsmöglichkeiten sind diese Optimierungen nun auch bei Stirnradverzahnungen möglich. Diese Geometrien waren bisher fertigungstechnisch schwierig zu realisieren. Moderne Umformverfahren und die folgende Hartfeinbearbeitung ermöglichen eine wirtschaftliche Herstellung, die neue Freiheitsgrade in der Auslegung eröffnet und so eine Lösung für alle Belange ermöglicht.

HÖRBARER FORTSCHRITT BEI DER BAUTEIL AUSLEGUNG

Die Sicherheitsaspekte allein zu betrachten, ist oft unzureichend. Das Geräuschverhalten im realen Einsatz ist von entscheidender Bedeutung. Es wird durch Stoß-, Weg- und Parameteranregungen beeinflusst [4]. Neben der Mikrogeometrie wirken sich die Radkörpersteifigkeit und die Lageranordnung auf die NVH-Eigenschaften aus. Die vorgestellten Optimierungen der Fußgeometrie beeinflussen auch die Parameteranregungen, also die Steifigkeitsschwankungen im Zahneingriff. Positive Einflüsse einer optimierten Fußgeometrie auf das Anregungsverhalten konnten bereits beobachtet werden.

Nicht zu vernachlässigen ist der Einfluss des Radkörpers auf die Körperschalltransmission, die eine entschei-

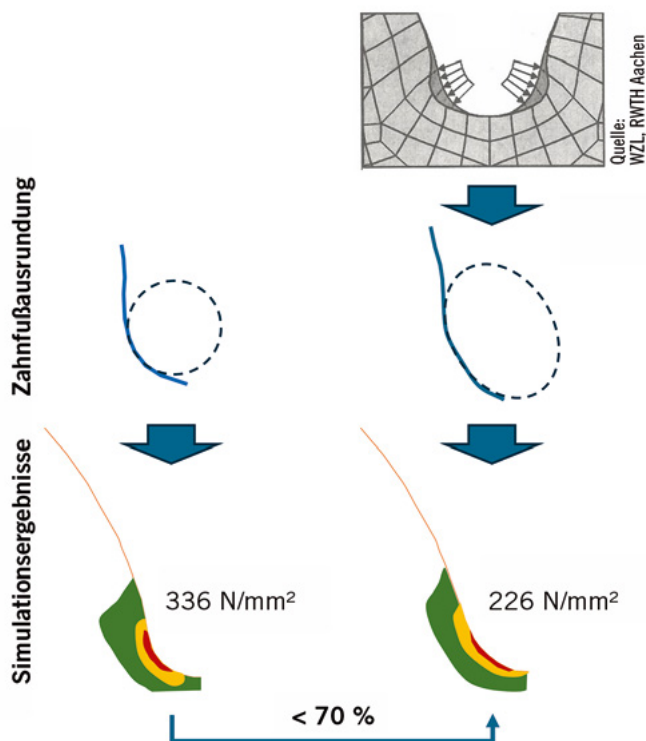


BILD 2 Auswirkung der Zahnfußausrundung auf die Belastung (© Hirschvogel)

dende Rolle beim NVH-Verhalten spielt. Gestaltoptimierte Lösungen für den Radkörper bieten eine effektive Möglichkeit, die Zahneingriffsfrequenz zu brechen, beispielsweise ein facettierter Radkörper, **BILD 3**.

An den Stirnflächen der Verzahnungen kommt es durch Eigenschwingungen zu einer Bewegung, die Einfluss auf die Geräuschbildung und das Laufverhalten hat. Diese Eigenschwingungen und Bewegungen verändern sich je nach Geometrie des Stirnradstegs. Auch wenn Simulationen zeigen, dass die Eigenfrequenzen des Rads nur geringfügig beeinflusst werden, wirkt sich die verändernde Nachgiebigkeit der Zähne positiv auf das Geräuschverhalten aus.

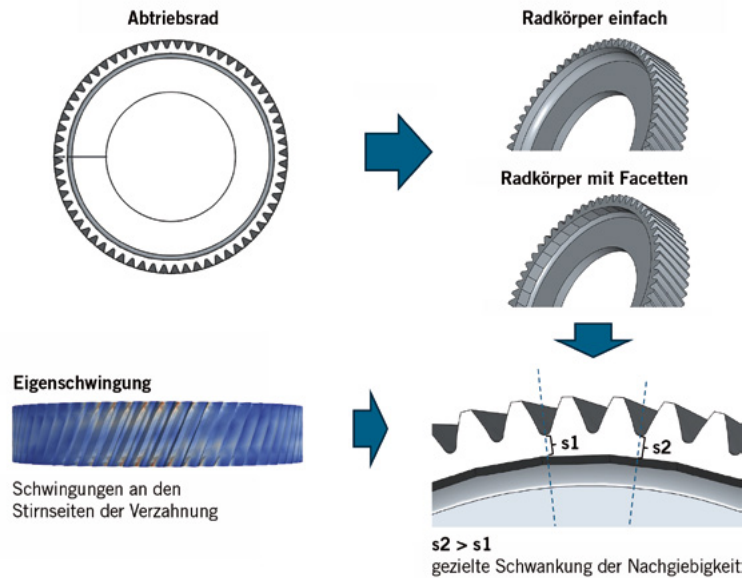
ZUSAMMENFASSUNG

Die Auslegung der letzten Übersetzungsstufe in elektrischen Achsantrieben erfordert zwingend eine ganzheitliche und systemorientierte Betrachtung von Wirkungsgrad, mechanischer Festigkeit und NVH-Eigenschaften. Die isolierte Optimierung einzelner Komponenten oder Kenngrößen führt in der Regel zu suboptimalen Gesamtergebnissen. Nur durch die systematische Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen zwischen Verzahnung, Lagerung, Radkörper und weiteren Komponenten können wirklich optimale Lösungen gefunden werden.

Die hier aufgezeigten Ergebnisse demonstrieren, dass die typischen Zielkonflikte zwischen Effizienz, Festigkeit und Geräuschverhalten durch eine intelli-

gente Gestaltoptimierung der Bauteile und den Einsatz angepasster Fertigungsverfahren signifikant entschärft werden können. Insbesondere die Kombination aus optimierter Fußgeometrie, systemischer Wirkungsgradbetrachtung und gestaltoptimiertem Radkörper eröffnet neue Möglichkeiten, die bei konventioneller Auslegung nicht zugänglich wären. Dank moderner Umformtechnologie, insbesondere dem Präzisionsschmieden, lassen sich die vorgestellten Gestaltoptimierungen bei der Hirschvogel Group zudem wirtschaftlich realisieren.

BILD 3 Optimierung des Radkörpers zur Verbesserung von Lauf- und Geräuschverhalten (© Hirschvogel)



LITERATURHINWEISE

- [1] Rütjes, U. A.: Rethinking Gears: From Idea to Virtual Assembly. 35. Aachen Colloquium Sustainable Mobility, Aachen, 2025
- [2] Brömsen, O.: Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit von einsatzgehärteten Stirnrädern durch rechnerische Zahnfußoptimierung. Aachen: Shaker Verlag, 2005
- [3] Rütjes, U. A.: Differentialkegelräder – Das Gesamtsystem als Resultat der optimierten Komponente. In: Innovationen rund ums Kegelrad: 14.-15. März 2018. Aachen: Apprimus Verlag, 2018
- [4] Gacka, A.: Neue Ansätze bei der Dynamiksimulation von Kegelradgetrieben. Seminar: Innovationen rund ums Kegelrad 2008, WZL-Forum, Aachen, 2008

FOLGEN SIE UNS:

www.hirschvogel.com



IMPRESSUM:

Sonderausgabe 2026 in Kooperation mit Hirschvogel Holding GmbH,
Dr.-Manfred-Hirschvogel-Strasse 6, 86920 Denklingen;
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173 Wiesbaden,
Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Alexandra Dambeck

PROJEKTMANAGEMENT: Anja Trabus

TITELBILD: © Hirschvogel



Hirschvogel
Group

Traditionally innovative.

HIDDEN CHAMPIONS



Differential-Kegelrad

Gefertigt, um große Drehmomente zu übertragen, insbesondere bei Elektrofahrzeugen. Hochbelastbar, mit bester Verzahnungsqualität und Oberflächenrauheit – und dank des hohen Automatisierungsgrads ist eine kosten- und ressourcenoptimale Produktion garantiert.

In nahezu jedem Auto fährt im Verborgenen ein Bauteil von uns mit. Fast überall setzt man bei massivumgeformten und weiterveredelten Bauteilen aus Stahl und Aluminium auf das Qualitäts-Plus von Hirschvogel – das Plus an Robustheit und Langlebigkeit. Entdecken Sie, was dahintersteckt!

hirschvogel.com/produktportfolio

