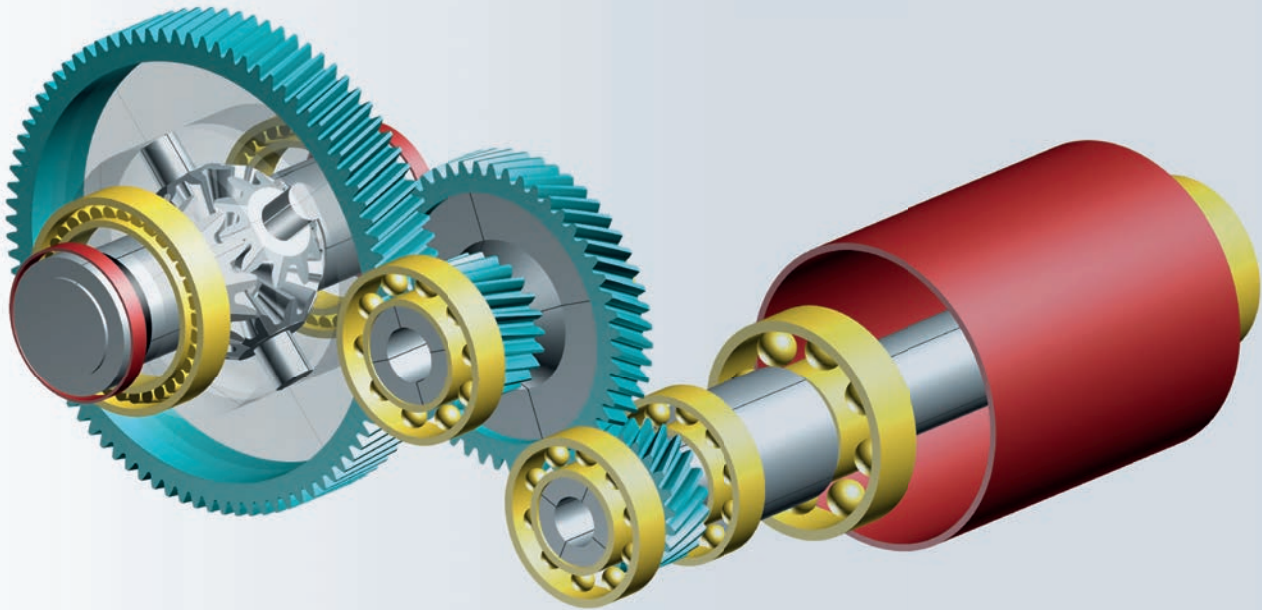


EFFIZIENTER AUSLEGUNGSPROZESS FÜR STIRNRADGETRIEBE – TEIL 2



Die Auslegung und Konstruktion von Getrieben erfolgen heutzutage in den meisten Fällen unter Einsatz von spezialisierter Software. Aktuelle Programme implementieren dabei die einschlägigen Normen, insbesondere für die Festigkeitsberechnungen. Die Vorgehensweise bei der Auslegung eines Getriebes wird hier am Beispiel des Programms KISSsoft illustriert. Diese Software führt Festigkeitsberechnungen für die in Getrieben verwendeten Maschinenelemente durch. Bei den Zahnrädern werden zusätzlich die Zahnradgeometrie und Effekte wie Wirkungsgrad und Geräuschentwicklung behandelt. Als modernes Programm enthält KISSsoft auch eine Systembewertung, welche das Getriebe als Gesamtsystem betrachtet und die Konsistenz der einzelnen Auslegungen zueinander sicherstellt.

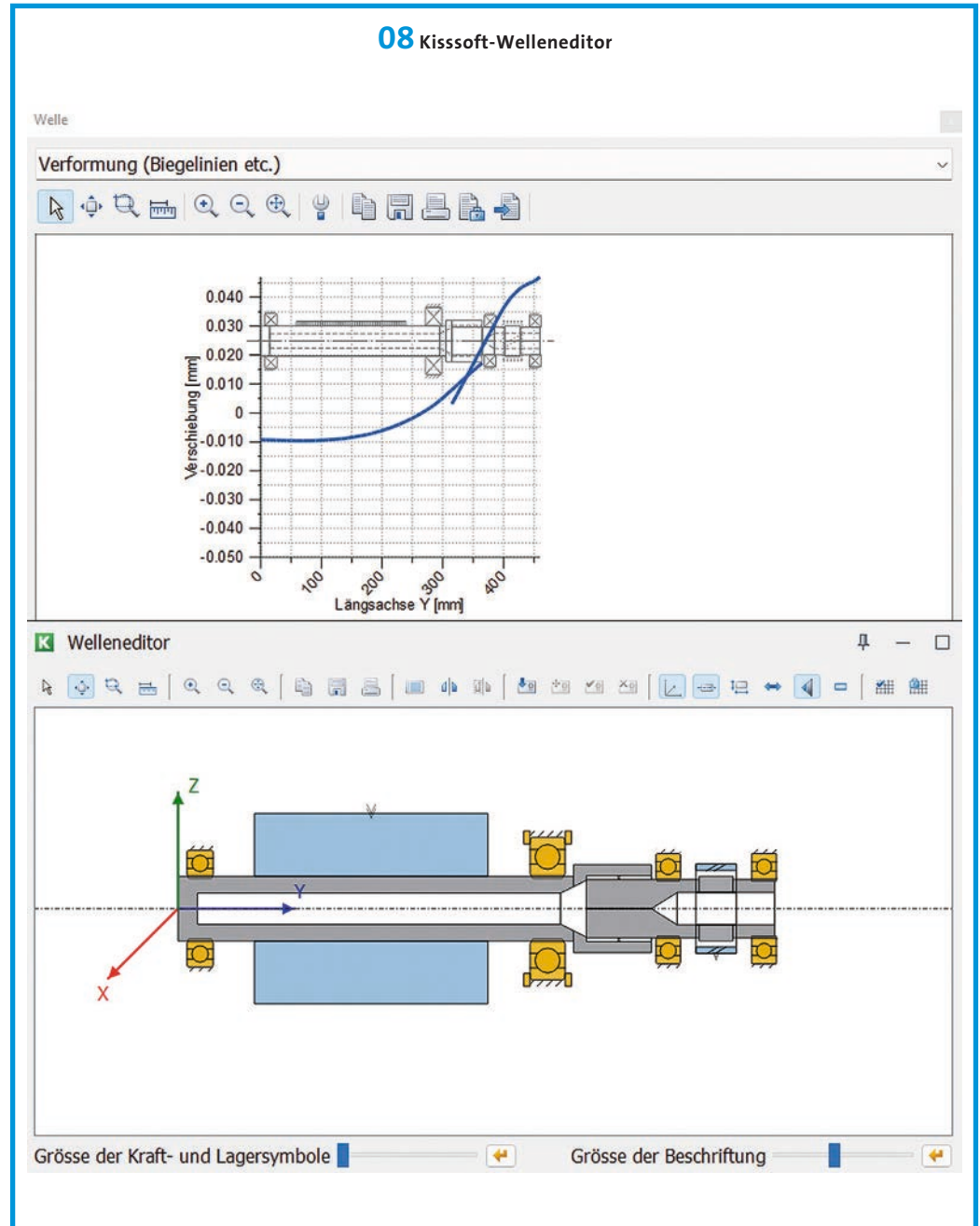
Teil 1 des wissenschaftlichen Artikels finden Sie in Ausgabe 03/2022 der **antriebstechnik**.

4. WELLEN UND LAGER

Nach der Auslegung der Verzahnungen sind nun noch die Wellen zu konstruieren und die Lager auszuwählen. Für die Wellen sind die Geometrien häufig nicht von Festigkeitsaspekten, sondern von der Funktionalität her bestimmt: Durch Lagersitze, Zahnräder und Kupplungselemente ist meistens bereits ein gewisser Wellendurchmesser festgelegt. Somit bleibt nicht mehr viel Freiheit für den Rest der Wellengeometrie.

Seit einsatzgehärtete Verzahnungen sich durchgesetzt haben, stellt die Auswahl der Lager häufig einen kritischen Punkt dar: Durch die relativ kleinen Achsabstände, welche die modernen Hochleistungsverzahnungen noch benötigen, ist oft nicht genug Bauraum für die Lager vorhanden. Es müssen nicht nur die Lager selbst passen, ohne mit den Lagern von der Gegenwelle zu kollidieren, sondern es muss noch ausreichend Material um die Lager vorhanden sein. Da andererseits Lager mit höherer Tragfähigkeit oft deutlich teurer ausfallen, kann es schwierig werden, einen vernünftigen Kompromiss zu finden.

Auch bei dieser Aufgabenstellung kann Auslegungssoftware unterstützen, wobei hier der Systemansatz zentral ist: Denn die Problematik entsteht ja erst durch die Kombination der einzelnen Elemente.



5. MIKROGEOMETRIE UND OPTIMIERUNG VON ZAHNRÄDERN

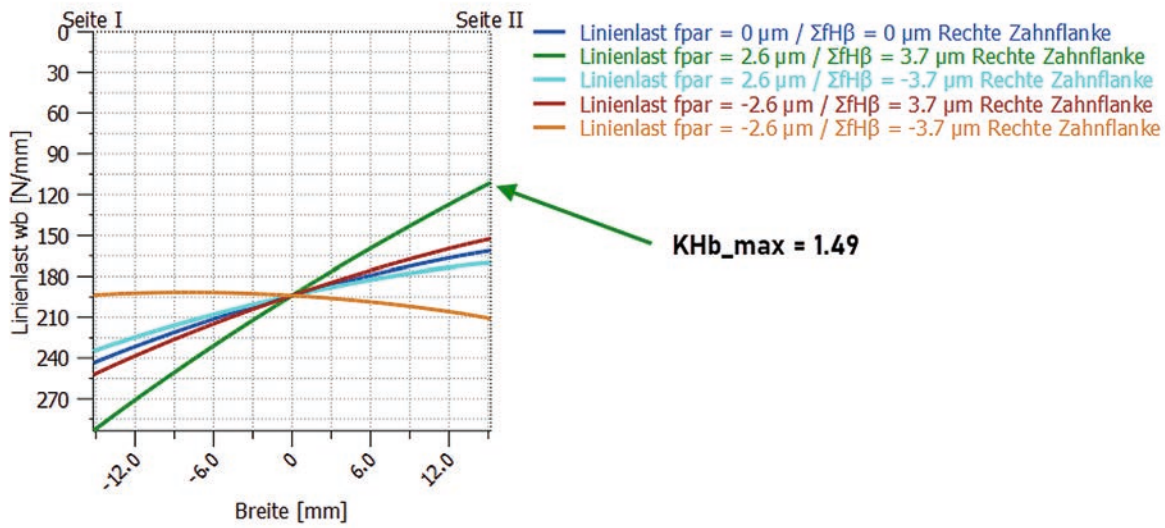
In der letzten Phase wird die Mikrogeometrie der Zahnräder bestimmt. Das Ziel dieses Schrittes besteht darin, die Flankenlinien- und Profilkorrekturen auszuliegen. Dabei sollen Flankenlinienkorrekturen das Tragbild verbessern, was wiederum gut für die Lebensdauer ist. Profilkorrekturen haben geringere Geräuschemissionen und einen besseren Wirkungsgrad als Ziel. Hier ist die Auswahl der Korrekturparameter direkt mit dem Fertigbearbeitungsprozess verknüpft. Nicht jeder Prozess kann dabei alle Korrekturen liefern. Allerdings konzentrieren wir uns an dieser Stelle auf die Auslegung von Flankenlinienkorrekturen, weil diese einen direkteren Einfluss auf die Festigkeit des Getriebes ausüben. Die Geräuschoptimierung und die Auslegung von Profilkorrekturen werden hier nicht behandelt.

Flankenlinienkorrekturen sollen die Verkippung sowie Verwindung des Zahnrads durch die Wellenbiegung/-torsion und

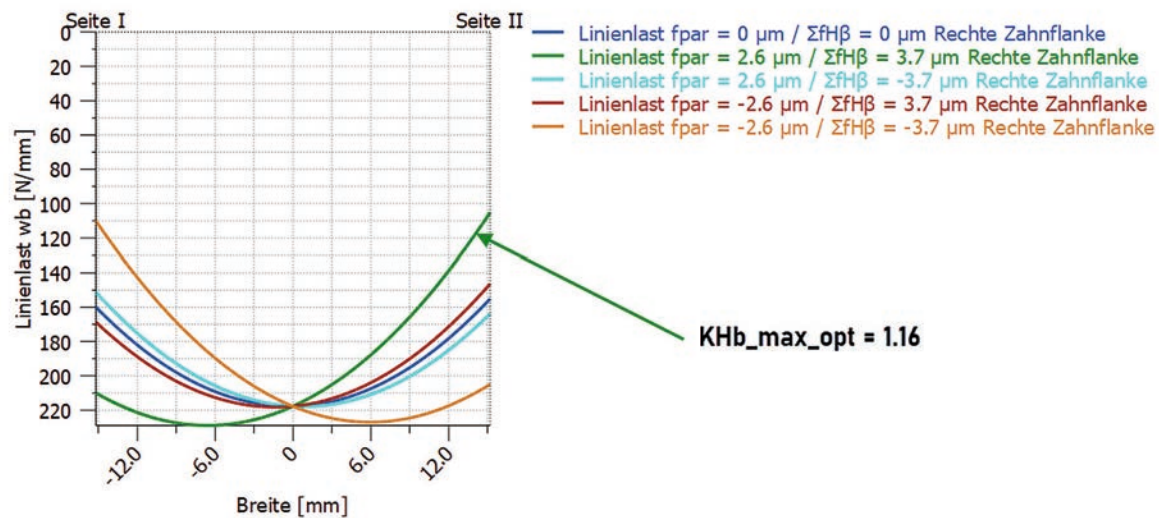
Wellenversätze aufgrund von Herstellfehlern, Lagerspiel, Verformung sowie Einflüsse der endlichen Gehäusesteifigkeit kompensieren. Optimale Flankenlinienkorrekturen führen aufgrund einer gleichmäßigeren Lastverteilung entlang der Flanke üblicherweise zu einer Erhöhung der Drehmomentkapazität des Getriebes. In der Norm ISO 6336 ist der Breitenlastfaktor $K_{H\beta}$ zur Erfassung der Lastüberhöhung durch ein nicht optimales Tragen vorgesehen. Er wird als der Quotient aus der höchsten Linienlast und der mittleren Last über die Zahnbreite definiert. Unter optimalen Bedingungen wäre der Breitenlastfaktor also gleich 1. Bei Zahnrädern mit höherer Qualität hängt der Breitenlastfaktor hauptsächlich von der Wellenverformung durch Biegung ab. In **Bild 08** sind die Resultate einer analytischen Berechnung einer Wellenverformung unter Berücksichtigung einer endlichen Lagersteifigkeit dargestellt (blaue Kurve).

Darüber hinaus sollten Herstellabweichungen wie die Nicht-Parallelität von Achsen (f_{ma}) und die Flankenlinien-Winkelabweichung ($f_{H\beta}$) berücksichtigt werden. Da Herstellfehler ein positives

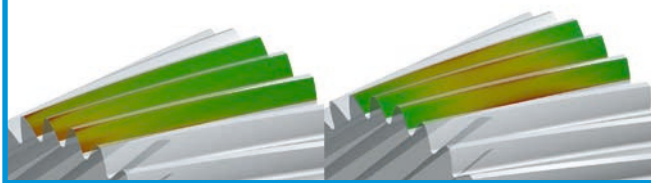
09 Resultierende Linienlast der ersten Stufe ohne Flankenlinienkorrekturen



10 Resultierende Linienlast mit Flankenlinienkorrekturen



11 Resultierende Lastverteilung mit Flankenlinienkorrekturen (rechts) und ohne Flankenlinienkorrekturen (links)



oder negatives Vorzeichen haben können, müssen mehrere Szenarien analysiert werden. In **Bild 09** ist die Lastverteilung für fünf verschiedene Fälle dargestellt:

- $f_{ma} = 0$ und $f_{H\beta} = 0$
- $f_{ma} (+)$ und $f_{H\beta} (+)$
- $f_{ma} (+)$ und $f_{H\beta} (-)$
- $f_{ma} (-)$ und $f_{H\beta} (+)$
- $f_{ma} (-)$ und $f_{H\beta} (-)$

Nach Anhang E von ISO 6336 ist die Festigkeitsberechnung mit dem höchsten Breitenlastfaktor (in diesem Beispiel $K_{H\beta} = 1,49$) durchzuführen, der aus den fünf vorstehenden Fällen resultiert.

Für eine Optimierung der Lastverteilung und des Breitenlastfaktors mit Herstellfehlern wird typischerweise eine Breitenballigkeit und eine Schrägungswinkelkorrektur hinzugefügt. Das Ziel besteht darin, die maximale Linienlast in sämtlichen Szenarien mit Herstellfehlern zu reduzieren und die Linienlastspitzen von den Kanten der Zahnräder zu distanzieren. Die Software liefert über einen Auslegungsknopf erste Vorschläge für die Korrekturparameter. Das Feintuning erfolgt dann vom Ingenieur, um bestmögliche Ergebnisse im Sinne der Lastverteilung zu erreichen. In **Bild 10** ist die Linienlast mit einer Breitenballigkeit von 4 Mikrometern und einer Schrägungswinkelkorrektur von -5 Mikrometern dargestellt. In diesem Beispiel liegt der höchste Breitenlastfaktor bei $f_{ma} (+)$ und $f_{H\beta} (+)$ und entspricht etwa 1,16.

Setzt man den Breitenlastfaktor in die Festigkeitsberechnung ein und rechnet die maximal übertragbare Leistung mit und ohne Flankenlinienkorrekturen, bekommt man 20 % mehr

Leistung, welche das Getriebe (für 5000 h) antreiben kann. Somit haben Flankenlinienkorrekturen einen direkten Einfluss auf die Sicherheitsfaktoren und auf die übertragbare Leistung von Getrieben. Zur Illustration ist in **Bild 11** die Lastverteilung am Zahn für die Stirnradstufe am Beispiel unseres Elektrofahrradgetriebes mit und ohne Flankenlinienkorrekturen dargestellt.

Die resultierende Zahnradgeometrie inkl. Flankenlinienkorrekturen wird auf einer Herstellzeichnung am Beispiel des Ritzels der ersten Stufen in Kisssoft praktisch zusammengefasst.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Auslegung von Stirnradgetrieben lässt sich in Kisssoft einfach und praktisch realisieren. In einem ersten Schritt wird die geforderte Gesamtübersetzung des Getriebes definiert, anschließend wird die Übersetzung sinnvoll aufgeteilt und die Stirnradstufen werden dimensioniert.

Das Verfahren für die Auslegung von Stirnrädern lässt sich in drei Hauptschritten unterteilen: Grobauslegung, Feinauslegung und Korrekturgang. Im Rahmen der Grobauslegung werden Dimensionen des Getriebes wie Achsabstand und Zahnbreite bestimmt.

Im nächsten Schritt wird die Makrogeometrie der Zahnräder festgelegt. Parameter wie Normalmodul, Eingriffswinkel, Schrägungswinkel und Bezugsprofil werden optimiert, um verschiedenen Konstruktionskriterien gerecht zu werden.

Im letzten Schritt wird die Mikrogeometrie der Zahnräder definiert. Es wurde in vorliegendem Fall gezeigt, dass sich die Drehmomentkapazität eines Elektrofahrradgetriebes durch Umsetzung gut konstruierter Flankenlinienkorrekturen deutlich erhöhen lässt.

Fotos: *KISSsoft*

www.kisssoft.com

Literaturverzeichnis

- [1] ISO 6336, *Tragfähigkeitsberechnung von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern, Teile 1, 2, 3 und 6*, 2019.
- [2] ISO 53, *Stirnräder für den allgemeinen und Schwermaschinenbau – Standard-Bezugszahnstangen – Zahnprofile*, 1998.
- [3] Kissling, U.: *Layout of the Gear Micro Geometry, Gear Solutions*, 2008.
- [4] DIN ISO 21771: 2014-08.
- [5] *Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung – Begriffe und Geometrie (ISO 21771:2007)*, 2014.
- [6] B. Schlecht *Maschinelemente 2*, Pearson Studium, Kapitel 18, 2009.
- [7] Roloff/Matek *Maschinenelemente*, Springer Vieweg 2019.

DER AUTOR



M.Sc. ETH Ilja Tsikur ist Vertriebsingenieur bei der Kisssoft AG in Bubikon, Schweiz

IMPRESSUM

antriebstechnik

erscheint 2022 im 61. Jahrgang,
ISSN 0722-8546 / ISSN E-Paper: 2747-7991

REDAKTION

Chefredakteur: Miles Meier (mm), Tel.: 06131/992-208, E-Mail: m.meier@vfmz.de (verantwortlich i.S.d. § 18 Abs. 2 MStV)

Redakteur/Redakteurin:

Dipl.-Ing. (FH) Peter Reinhardt (pr), Tel.: 06131/992-349, p.reinhardt@vfmz.de, Vanessa Weingärtner (vv), Tel.: 06131/992-352, E-Mail: v.weingaertner@vfmz.de

Redaktionsassistent:

Vivien Backof, Tel.: 06131/992-415, Melanie Lerch, Tel.: 06131/992-261, Petra Weidt, Tel.: 06131/992-371, E-Mail: redaktionsassistent_vfv@vfmz.de, (Redaktionsadresse siehe Verlag)

GESTALTUNG

Anette Fröder, Sonja Daniel, Conny Grothe

SALES

Oliver Jennen, Tel.: 06131/992-262, E-Mail: o.jennen@vfmz.de
Andreas Zepig, Tel.: 06131/992-206, E-Mail: a.zepig@vfmz.de

Auftragsmanagement:

Heike Rauschkolb, Tel.: 06131/992-241, E-Mail: h.rauschkolb@vfmz.de

Anzeigenpreisliste Nr. 58: gültig ab 1. Oktober 2021

LESERSERVICE

vertriebsunion meynen GmbH & Co. KG, Große Hub 10, 65344 Eltville, Tel.: 06123/9238-266
Bitte teilen Sie uns Anschriften- und sonstige Änderungen Ihrer Bezugsdaten schriftlich mit (Fax: 06123/9238-267, E-Mail: vfv@vertriebsunion.de).

Preise und Lieferbedingungen:

Einzelheftpreis: € 15,50 (zzgl. Versandkosten)
Jahresabonnement Inland: € 153,- (inkl. Versandkosten)
Jahresabonnement Ausland: € 168,- (inkl. Versandkosten)
Abonnements verlängern sich automatisch um ein weiteres Jahr, wenn sie nicht spätestens vier Wochen vor Ablauf des Bezugsjahres schriftlich gekündigt werden.

VERLAG

Vereinigte Fachverlage GmbH
Lise-Meitner-Straße 2, 55129 Mainz
Postfach 100465, 55135 Mainz
Tel.: 06131/992-200, Fax: 06131/992-100
E-Mail: info@vfmz.de
www.vereinigte-fachverlage.de
Handelsregister-Nr.: HRB 2270, Amtsgericht Mainz
Umsatzsteuer-ID: DE149063659
Ein Unternehmen der Cahensly Medien

Geschäftsführer: Dr. Olaf Theisen, Matthias Niewiem

Verlagsleiter: Dr. Michael Werner, Tel.: 06131/992-401

Chef vom Dienst: Dipl.-Ing. (FH) Winfried Bauer

Leitende Chefredakteurin: Dipl.-Ing. (FH) Nicole Steinicke

Head of Sales: Carmen Nawrath
Tel.: 06131/992-245, E-Mail: c.nawrath@vfmz.de (verantwortlich für den Anzeigenteil)

Vertrieb: Sarina Granzin, Tel.: 06131/992-148, E-Mail: s.granzin@vfmz.de

DRUCK UND VERARBEITUNG

Westdeutsche Verlags- und Druckerei GmbH
Kurfürstenstraße 4-6, 64546 Mörfelden-Walldorf

DATENSPEICHERUNG

Ihre Daten werden von der Vereinigte Fachverlage GmbH gespeichert, um Ihnen berufsbezogene, hochwertige Informationen zu bekommen zu lassen. Sowie möglicherweise von ausgewählten Unternehmen genutzt, um Sie über berufsbezogene Produkte und Dienstleistungen zu informieren. Dieser Speicherung und Nutzung kann jeder-

zeit schriftlich beim Verlag widersprochen werden (vertrieb@vfmz.de).

Die Zeitschrift sowie alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit der Annahme des redaktionellen Contents (Texte, Fotos, Grafiken etc.) und seiner Veröffentlichung in dieser Zeitschrift geht das umfassende, ausschließliche, räumlich, zeitlich und inhaltlich unbeschränkte Nutzungsrecht auf den Verlag über. Dies umfasst insbesondere das Recht zur Veröffentlichung in Printmedien aller Art sowie entsprechender Vervielfältigung und Verbreitung, das Recht zur Bearbeitung, Umgestaltung und Übersetzung, das Recht zur Nutzung für eigene Werbezwecke, das Recht zur elektronischen/digitalen Verwertung, z.B. Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen, zur Veröffentlichung in Datenbanken sowie Datenträger jedweder Art, wie z.B. die Darstellung im Rahmen von Internet- und Online-Dienstleistungen, CD-ROM, CD und DVD und der Datenbanknutzung und das Recht, die vorgenannten Nutzungsrechte auf Dritte zu übertragen, d.h. Nachdruckrechte einzuräumen. Eine Haftung für die Richtigkeit des redaktionellen Contents kann trotz sorgfältiger Prüfung durch die Redaktion nicht übernommen werden. Signierte Beiträge stellen nicht unbedingt die Ansicht der Redaktion dar. Für unverlangt eingesandte Manuskripte kann keine Gewähr übernommen werden. Grundsätzlich dürfen nur Werke eingesandt werden, über deren Nutzungsrechte der Einsender verfügt, und die nicht gleichzeitig an anderer Stelle zur Veröffentlichung eingereicht oder bereits veröffentlicht wurden.

Datenschutzerklärung: ds-vfv.vfmz.de

Es gelten die allgemeinen Geschäftsbedingungen.



Mitglied der Informations-Gemeinschaft zur Feststellung der Verbreitung von Werbeträgern e.V. (IVW), Berlin.