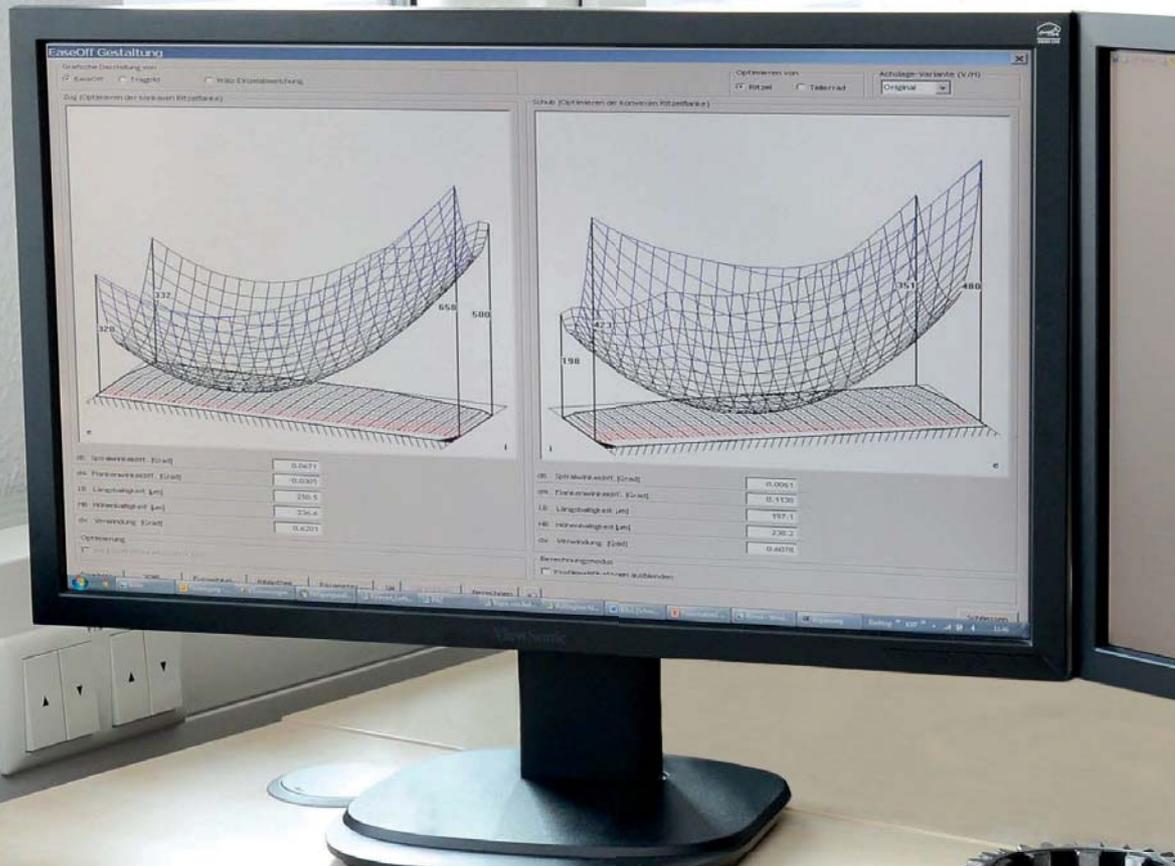


ANWENDUNGSOPTIMIERTE VERZÄHNUNGS-AUSLEGUNG MITTELS LOKALER TRAGFÄHIGKEITSBERECHNUNG



Kegelrad- und Hypoidgetriebe sind durch eine stark belastungsabhängige Tragbild-Lage gekennzeichnet, höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig zunehmender Verwendung von Leichtbau-Werkstoffen verstärken diesen Effekt. Genormte Verfahren zum Tragfähigkeitsnachweis, wie z. B. nach DIN 3991, ISO 10300, AGMA 2003-86 und DNV, gehen von einer stabilen Tragbild-Lage aus – und sind daher nur bedingt anwendbar. Sehr viel praxisnäher sind neue Berechnungsverfahren und der lokale Tragfähigkeitsnachweis in BECAL: Diese unterstützen jetzt die anwendungsoptimierte Auslegung von hochbelasteten Hypoidgetrieben.

Um die komplexen Zusammenhänge in Kegelrad- und Hypoidrad-Verzahnungen abzubilden und eine möglichst genaue Vorhersage der Eigenschaften einer Verzahnung machen zu können – besonders hinsichtlich Tragfähigkeit und Geräuschentwicklung –, ist ein lokaler Ansatz notwendig, der die Einflüsse der Makro- und Mikrogeometrie von Ritzel und Rad sowie deren lastspezifische Relativlage erfassen kann.

Lokaler Tragfähigkeitsnachweis in BECAL



von Dr.-Ing. Michael Senf, IMM, Technische Universität Dresden



und Dr.-Ing. Stefan Schumann, IMM, Technische Universität Dresden

Ein solcher lokaler Ansatz wird mit dem Programmpaket BECAL vom Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion (IMM) der Technischen Universität Dresden seit vielen Jahren verfolgt und ausgebaut.

Voraussetzung für die lokale Berechnung von Lasten und Beanspruchungen ist stets die genaue Kenntnis der Verzahnungsgeometrie. Diese kann direkt punktweise durch die Klingelberg Software KIMoS (Klingelberg Integrated Manufacturing of Spiral Bevel Gears) vorgegeben werden. Durch die Überführung dieser Vielzahl von Flanken- und Fußpunkten der Verzahnung in eine Tensorprodukt-Fläche wird eine Simu-

lation des Zahnkontaktes möglich. Dabei können sowohl die spezifische Relativlage von Ritzel und Tellerrad als auch bekannte Flankenform-Abweichungen berücksichtigt werden. Des Weiteren ist es möglich, Messdaten aus 3D-Koordinaten-Messmaschinen in die Abbildung der realen Flankenengeometrie einfließen zu lassen.

Auf Grundlage der lastfreien Zahnkontakt-Simulation erfolgt eine numerische Lastverteilungsrechnung, die speziell für die nicht-linearen Kontaktbedingungen am Kegelrad entwickelt und optimiert wurde. Dadurch wird eine besonders schnelle, aber dennoch sehr genaue Berechnung der Lastverteilung über der Zahnflanke möglich, der sich eine darauf aufbauende lokale Bestimmung der Pressungs- und Fußspannungsverteilung anschließt. Weiterhin können lokale Gleitgeschwindigkeiten und deren Richtungen bestimmt werden, die eine weitere wichtige Eingangsgröße für die sich anschließenden lokalen Tragfähigkeitsnachweise darstellen. So können Sicherheiten bezüglich Grübchen, Grauflecken, Fresser oder Zahnfuß-Brüchen berechnet werden.

Zur Bewertung der Geräuschentwicklung wird in BECAL die Drehweg-Abweichung unter Last herangezogen, die ebenfalls in Abhängigkeit der Relativlage von Ritzel und Rad ermittelt wird. Diese stellt die wesent-

SCHNELLESE-INFO

So werden Sicherheiten bzgl. Grübchen, Grauflecken, Fresser oder Zahnfußbrüche nach BECAL berechnet:

- Voraussetzung: genaue Kenntnis der Verzahnungsgeometrie (über BECAL oder KIMoS)
- Überführung der Flanken- und Fußpunkte in eine Tensorprodukt-Fläche zur Simulation des Zahnkontaktes
- Optional: Integration von Ist-Messdaten aus 3D-Koordinaten-Messmaschinen
- Numerische Lastverteilungsrechnung auf Grundlage der lastfreien Zahnkontakt-Simulation
- Darauf aufbauend lokale Bestimmung der Pressungs- und Fußspannungsverteilung
- Bestimmung der lokalen Gleitgeschwindigkeiten und deren Richtung

Der in BECAL verwendete lokale Ansatz ermöglicht eine sehr genaue Vorhersage der Eigenschaften einer Verzahnung.

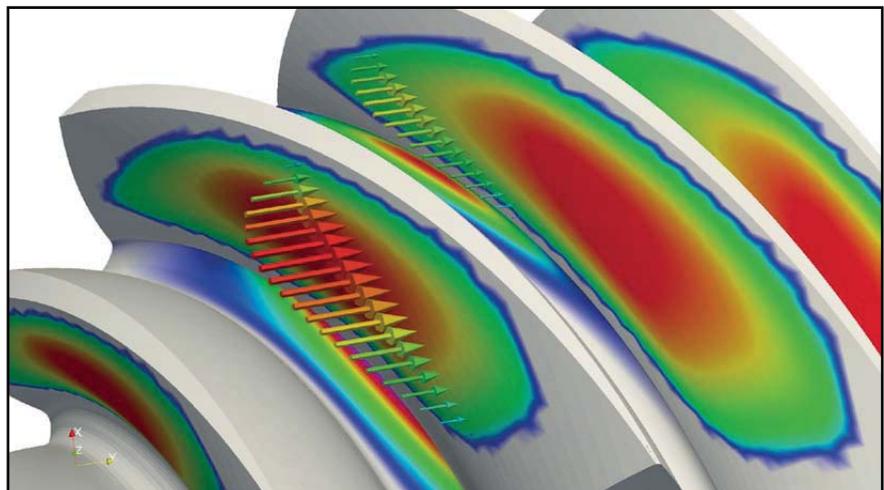


Abb. 1: Belastungen und Beanspruchungen am Kegelrad

Kompakt

Rund um BECAL

Experimentelle Untersuchungen an Kegelrädern, durchgeführt von der FVA, bildeten die Grundlage für den lokalen Tragfähigkeitsnachweis hinsichtlich Grübchenschäden und Zahnfuß-Bruch in der BECAL-Simulation.

liche Kenngröße der Parameteranregung von Drehschwingungen sowie des Geräusches dar.

Der in BECAL verwendete lokale Ansatz ermöglicht es, auch die lineare Schadensakkumulation bei Lastkollektiv-Berechnungen auf diskrete Punkte der Zahnflanke bzw. des Zahnfußes anzuwenden. Somit kann, begünstigt durch die kurzen Rechenzeiten, eine dem vorherrschenden Lastkollektiv angepasste Auslegung von Kegelrad-Verzahnungen durchgeführt werden.

experimentellen Versuchen und setzt eine Abstimmung mit der Berechnung der Beanspruchung voraus. Derartige Untersuchungen an Kegelrädern sind in einer Reihe von Forschungsvorhaben der FVA, gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF, vorgenommen worden; sie bilden die Grundlage für den Tragfähigkeitsnachweis gegenüber Grübchenschäden und Zahnfuß-Bruch in der BECAL-Simulation und führten zur überarbeiteten Version der ISO 10300 Methode B1 genormte Berechnungsverfahren.

Tragfähigkeitsberechnung bzgl. Grübchen- und Fußbruch-Schäden



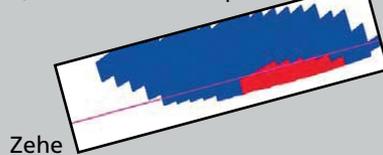
von Dr.-Ing. Christian Wirth, ZG – Zahnräder und Getriebe GmbH

Grundlage eines Tragfähigkeitsnachweises (Berechnung der Sicherheit) ist die Kenntnis der Beanspruchbarkeit. Diese basiert auf

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen eines im Jahr 2008 abgeschlossenen Projekts, in dem der Fokus auf der Grübchen- und Fuß-Tragfähigkeit in Zusammenhang mit dem Achsversatz lag, wurden in Wöhlerversuchen für zehn verschiedene Verzahnungsvarianten (insgesamt 200 Radsätze) die Ritzel-Tragfähigkeiten ermittelt. Grundsätzlich reduzieren sich Fußspannungen und Flankenpressungen des Ritzels mit zunehmendem Achsversatz bei gleicher Zähnezahl, gleichem Tellerrad-Durchmesser, gleichem Summen-Schrägungswinkel ($\beta_{m1} + \beta_{m2}$) und vergleichbaren Überdeckungsverhältnissen. Ursache hierfür ist u.a. der mit zunehmendem Achsversatz größer werdende Ritzeldurchmesser.

GRÜBCHEN-TRAGFÄHIGKEIT

4,7 Mio. Ritzel-Lastspiele



18 Mio. Ritzel-Lastspiele

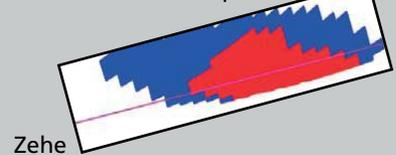


Abb. 2: Gegenüberstellung von Rechnung und Versuch

In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass zur Beurteilung der Zahnfuß-Beanspruchung im Wesentlichen die Zahnfuß-Spannung in der Nähe der 30°-Tangente (wie von Stirnrädern bekannt) maßgebend ist. Die Bestimmung der Grübchen-Tragfähigkeit erfordert allerdings nicht nur die Bewertung der Pressung, sondern, wie die Versuche gezeigt haben, auch die Bewertung der Gleitverhältnisse. Es konnten zwar bei moderaten Achsversätzen noch Steigerungen in der Ritzel-Tragfähigkeit ermittelt werden, jedoch fielen die zulässigen Flankenpressungen beim höchsten untersuchten Achsversatz (25 % Achsversatz, bezogen auf den äußeren Tellerrad-Durchmesser) um mehr als 20 % ab. Großen Einfluss haben hierbei die Zahnmassen-Temperaturen, die einerseits durch die Gleitgeschwindigkeiten auf der Flanke beeinflusst werden, andererseits durch die Flanken-Tangentialgeschwin-

digkeiten und die sich daraus ergebenden Schmierbedingungen (Blitztemperatur, Reibungszahl, etc.) im Zahnkontakt.

Aus den theoretischen Untersuchungen und den Versuchsergebnissen wurden für das höherwertige Rechenverfahren örtlich bestimmbare Faktoren ermittelt, mit denen ein lokaler Tragfähigkeitsnachweis möglich ist. So lässt sich der Einfluss der Mikrogeometrie der Verzahnung hinsichtlich der Tragfähigkeit rechnerisch untersuchen. Durch Modifikation des Tragbildes kann damit das Tragfähigkeitspotenzial der Verzahnung optimiert werden.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts stehen als Rechenverfahren in BECAL zur Verfügung. Das einfache, normfähige Rechenverfahren wurde aus dem höherwertigen Verfahren abgeleitet und an ihm kalibriert.

Dimensionierung und Festigkeitsnachweis mittels normfähigen Verfahrens

Zahnkontakt-Analyse und EaseOff-Entwicklung

Zahnkontakt-Analyse unter Last und lokaler Tragfähigkeitsnachweis

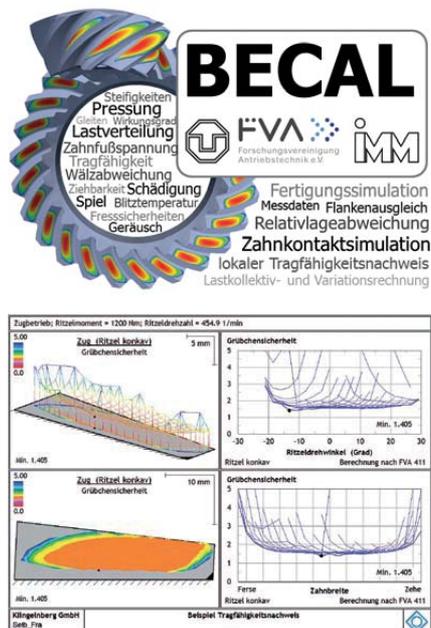
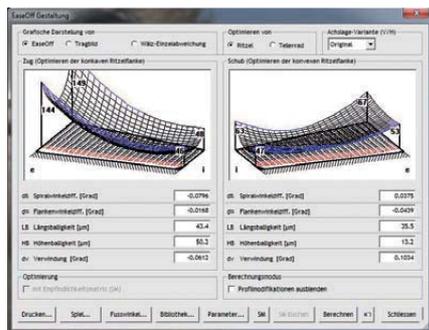
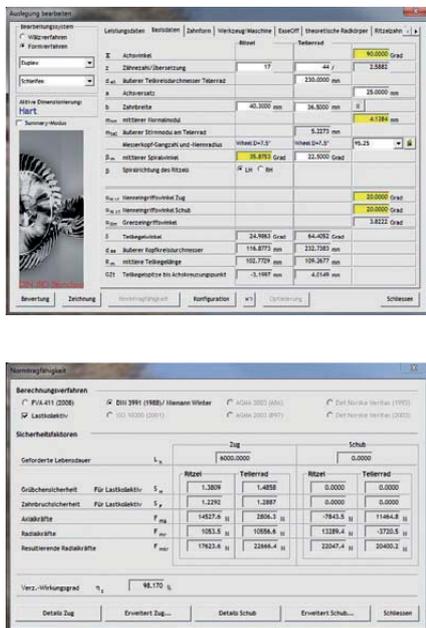


Abb. 3: Ablauf Verzahnungsauslegung

Es floss in die Überarbeitung der ISO 10300 „Calculation of load capacity of bevel gears“ ein, die im April 2014 veröffentlicht wurde. Im Gegensatz zur ersten Ausgabe von 2001 können nun auch achsversetzte Kegelräder hinsichtlich der Fuß- und Grübchen-Tragfähigkeit evaluiert werden.

Hypoidverzahnung in einem Programmpaket durchzuführen. Dabei werden im Wesentlichen folgende Schritte durchlaufen:

- Dimensionierungsrechnung zur Festlegung der Makrogeometrie
- Tragfähigkeitsnachweis mittels normfähigem Rechenverfahren in KN_Plus
- Herstellsimulation und darauf aufbauende EaseOff-Entwicklung zur Festlegung der Mikrogeometrie
- Lokaler Tragfähigkeitsnachweis in BECAL

Kompatibilität: Die Programme KN_Plus (genormter Tragfähigkeitsnachweis) und BECAL (lokaler Tragfähigkeitsnachweis) können in KIMoS eingebunden werden; ebenso lässt sich ein Lastkollektiv-Editor integrieren.

Die Definition der Makrogeometrie während der Dimensionierungsrechnung hängt von dem gewählten Verzahnverfahren und dem Werkzeug sowie von den Vorgaben aus der Getriebekonstruktion ab. Mit dem daran anschließenden Tragfähigkeitsnachweis mittels normfähigem Rechenverfahren erhält der Anwender schnell eine zuverlässige Aussage über die zu erwartende Tragfähigkeit der Verzahnung – und kann makrogeometrische Größen bei Bedarf direkt anpassen.

Anwendung in KIMoS

Die Programme KN_Plus (genormter Tragfähigkeitsnachweis) und BECAL (lokaler Tragfähigkeitsnachweis) sind optional in KIMoS eingebunden. Für den Anwender besteht somit die Möglichkeit, die komplette Auslegung und Nachrechnung der Kegelrad- oder

Im weiteren Schritt wird dann durch eine Herstellsimulation die Flankenform der kämmenden Flankenpaare ermittelt. Die durch Koordinatengitter beschriebenen Flanken werden dann für eine Kontaktanalyse verwendet, aus der als wichtigstes Ergebnis der EaseOff ermittelt wird – und daraus abge-

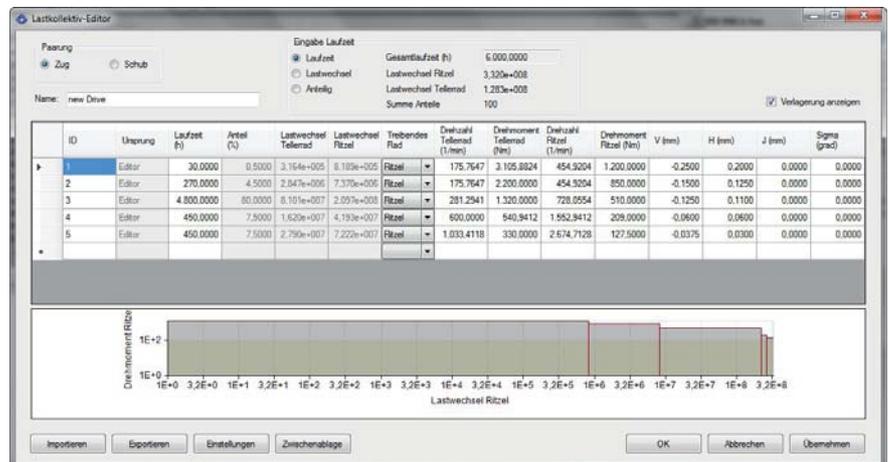


Abb. 4: Lastkollektiv-Editor

leitet dann Tragbild, Drehfehler, Flankenspiel etc. Über Modifikationen der den EaseOff beschreibenden Parameter wird dieser so weit optimiert, bis die gestellten Anforderungen an Tragbild-Lage, Drehfehler und Verlagerungsfähigkeit erfüllt sind.

Um die Verlagerungsfähigkeit zu überprüfen, müssen die Veränderungen in der Relativlage zwischen den kämmenden Flanken vorgegeben sein. In KIMoS integriert ist ein Lastkollektiv-Editor, mit dessen Hilfe Laststufen inklusive der zugehörigen Verlagerungen entweder manuell eingegeben oder importiert werden können. Eine komfortable Möglichkeit zur Berechnung der relativen Verlagerungen der kämmenden Flanken bietet der RomaxDESIGNER. In diesem Programm lassen sich vergleichsweise schnell komplette Getriebezüge modellieren und einer statischen Analyse unterziehen. Die Ergebnisse können in Form kompletter Lastkollektive mit den zugehörigen Verlagerungen in KIMoS importiert werden.

Sind nun Mikrogeometrie, Belastungen und zugehörige Verlagerungen definiert, sind die Voraussetzungen für die Zahnkontakt-Analyse unter Last inklusive eines aussagefähigen lokalen Tragfähigkeitsnachweises erfüllt. Alle notwendigen Daten werden dem Programm BECAL übergeben, die Berechnung erfolgt innerhalb kurzer Zeit. Anhand der Ergebnisse ist der Anwender nun in der Lage zu entscheiden, ob die Verzahnungsauslegung den geforderten Kriterien hinsichtlich Tragfähigkeit, Sicherheit bezüglich Zahnschäden und Laufruhe entspricht. Sind weitere Optimierungen notwendig, werden diese in der EaseOff-Entwicklung umgesetzt, die Validierung erfolgt wiederum durch die Zahnkontakt-Analyse unter Last in BECAL. ◆

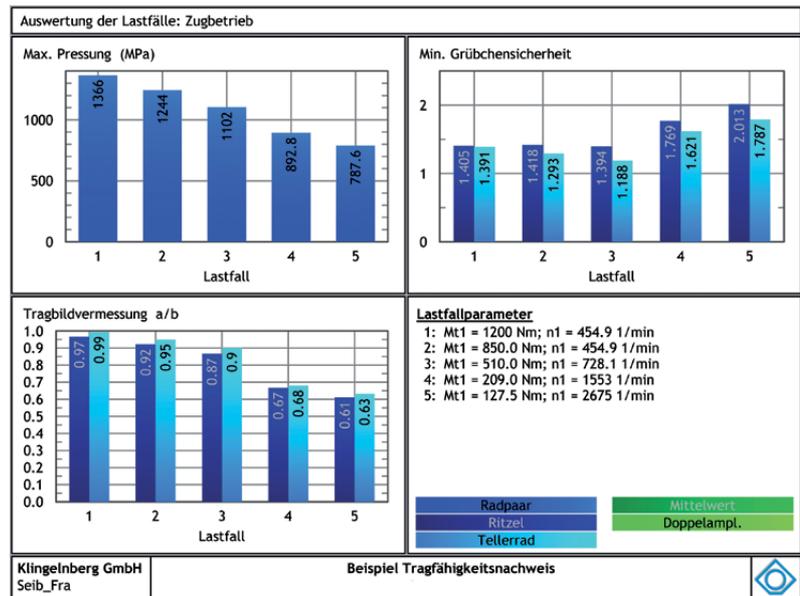


Abb. 5a: Übersicht über alle Laststufen (hier Zugbetrieb)

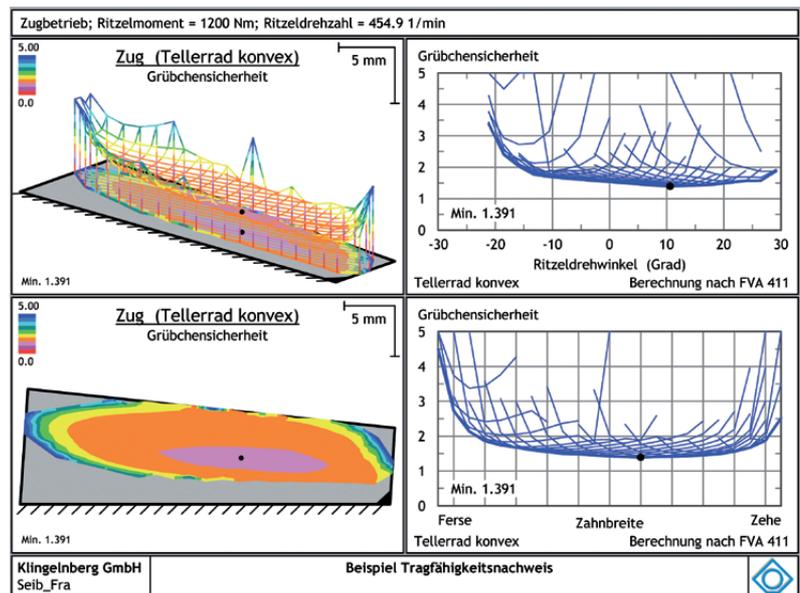


Abb. 5b: Detailergebnis Sicherheit gegen Grübchen



Dipl.-Ing. Frank Seibicke

Leitung CA-Tools,
KLINGELNBERG GmbH