



Automatisierte Tragbildprüfung mit Thermografie

Sadler Fränz, edervis GmbH

WHITEPAPER



Video anschauen



Abstrakt

Zahnradgetriebe sind in Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Energieerzeugung zentrale Komponenten der Leistungsübertragung. Abweichungen im Zahnflankenkontakt führen zu erhöhtem Verschleiß, Geräuschentwicklung und Leistungsverlusten – mit teils gravierenden Folgen für Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Die von edevis entwickelte thermografische Tragbildprüfung setzt hier an: Sie erfasst lastbedingte Temperaturmuster an Zahnflanken berührungslos und ohne Hilfsstoffe, und stellt so sicher, dass die Kraftübertragung präzise im definierten Tragpunkt erfolgt. Die thermografische Tragbildprüfung lässt sich als automatisierte Qualitätskontrolle in den Fertigungsprozess integrieren.

Einleitung

Die Qualität der Verzahnung entscheidet über Effizienz, Laufruhe und Lebensdauer eines Getriebes. In der Elektromobilität ist dieser Zusammenhang besonders spürbar: Ohne die maskierende Geräuschkulisse des Verbrennungsmotors treten Verzahnungsfehler akustisch unmittelbar in Erscheinung und werden von Fahrern wie Qualitätsprüfern sofort wahrgenommen. Doch die Relevanz reicht weit über den Antriebsstrang von PKW hinaus. Ob Nutzfahrzeuggetriebe unter Dauerlast, Windkraftanlagen mit ihren extremen Betriebszyklen oder Industriegeräte in der Prozessfertigung – überall dort, wo Drehmoment zuverlässig übertragen werden muss, ist eine präzise Tragbildkontrolle nützlich.

Klassische Prüfmethode stoßen dabei an ihre Grenzen. Der manuelle Farbauftrag liefert subjektive Ergebnisse, ist zeitintensiv und lässt sich in automatisierte Produktionslinien kaum integrieren. Die thermografische Tragbildprüfung schließt diese Lücke: Sie misst Temperaturmuster an den Kontaktflächen berührungslos, reproduzierbar und in Echtzeit, und macht so das Tragbild für eine vollautomatische 100%-Prüfung zugänglich, ohne dass chemische Hilfsstoffe und eine nachgelagerte Reinigung erforderlich wären.

Hintergrund

Bislang wird, vor allem bei Hypoidgetrieben, die Tragbildprüfung mit Farbauftrag und anschließender manueller Beurteilung geprüft. Dazu wird eine dünne Farbschicht (Tuschierpaste oder -lack) auf die zu prüfenden Zahnflanken aufgetragen. Bringt man die Zahnräder anschließend zum Eingriff, wird an den Stellen mit Kontakt die Farbe durch Druck oder Abrieb entfernt. Das entstehende Abbild, zum Beispiel die Verdrängung einer ölfesten Paste auf der Verzahnung, zeigt, wo die Flanken tatsächlich tragen. Danach beurteilt ein Fachmann visuell, ob Lage und Größe der Abdrücke dem Sollzustand entsprechen.

Bei Abweichungen wird justiert – etwa durch retroaktives Verschieben der Zahnräder zueinander (z. B. mit Passscheiben) oder durch proaktives Anpassen der Fertigungsparameter. Vor der Inbetriebnahme müssen zudem alle Farbreste rückstandsfrei entfernt werden. Dabei hat die klassische Tragbildprüfung mit Farbauftrag mehrere Nachteile:

- Jeder Prüfvorgang erfordert Farbauftrag, Fügen der Teile und anschließende Reinigung mit erhöhtem Zeit- und Personalaufwand
- Die Bewertung erfolgt visuell, oftmals augenscheinlich. Das Ergebnis hängt von Erfahrung und Interpretation des Prüfers ab.
- Der Abdruck zeigt nur den Summenabdruck der Kontakte, oftmals wird aus Zeitgründen nur an einem Teilsegment des Zahnrads der Tragpunkt geprüft. Lokale Abweichungen einzelner Tragpunkte können übersehen werden.
- Manuelles Tuschieren lässt sich kaum inline in eine automatisierte Fertigung integrieren; 100%-Prüfungen sind praktisch nicht umsetzbar.
- Ungleichmäßiger oder unvollständiger Farbauftrag können das Bild verfälschen. Diese Grenzen schaffen Bedarf für ein objektiveres, effizienteres Verfahren, hier setzt die thermografische Tragbildprüfung an.

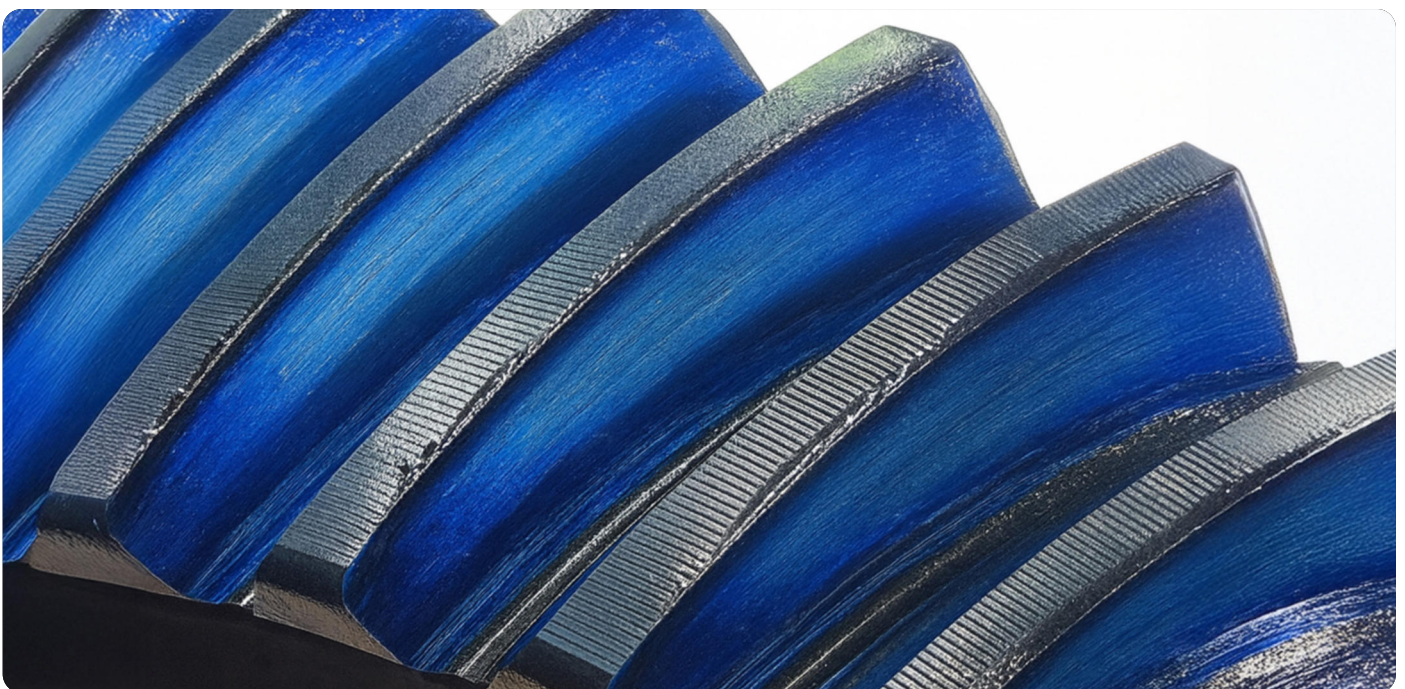


Abb. 1 klassische Tragbildprüfung mit Tuschierpaste

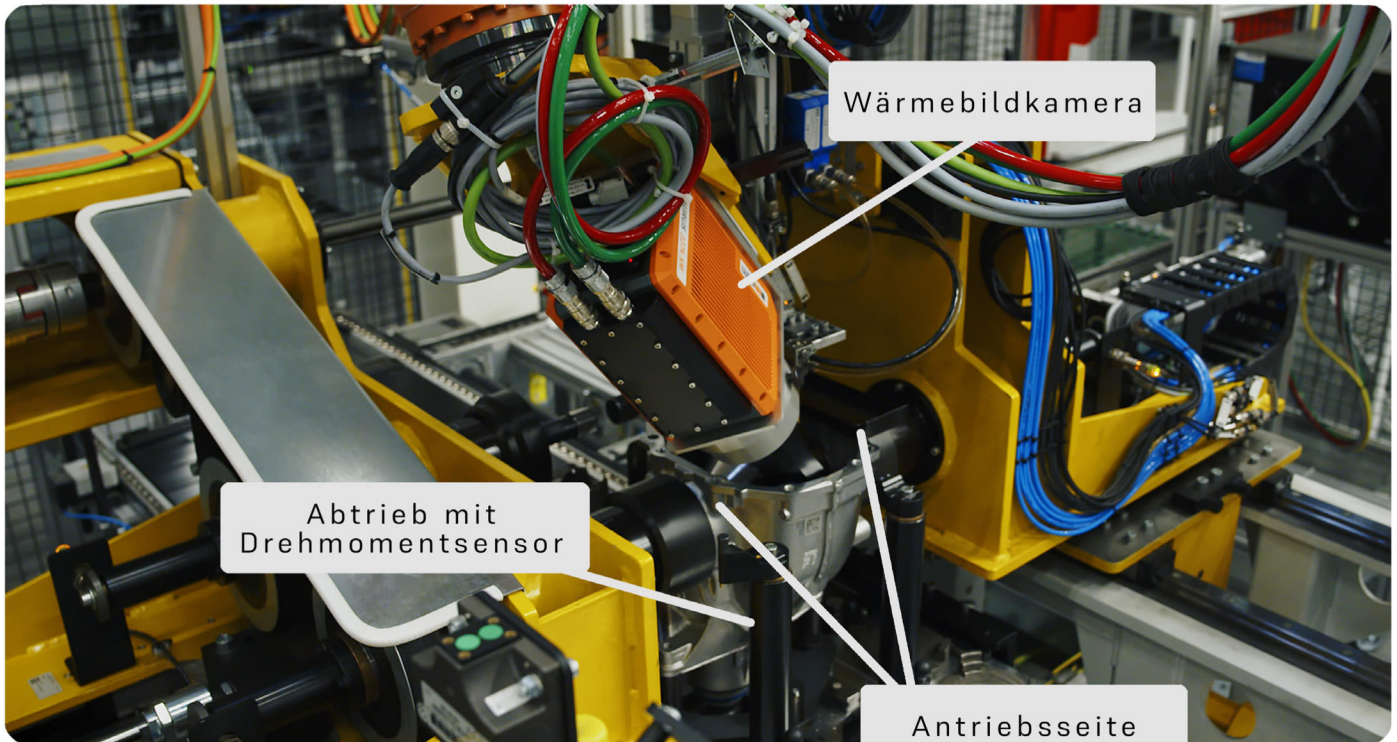


Abb. 2 Aufbau der Messzelle mit Kamera und Antriebseinheit

Thermografische Tragbildprüfung

Bei der thermografischen Tragbildprüfung wird das Tragbild eines Zahnradpaars anhand der entstehenden Wärmebilder sichtbar gemacht. Unter definierter mechanischer Last erzeugt die Reibung der Zahnflanken (Wälzgleiten) ein charakteristisches Wärmemuster. Dieses wird mit einer Infrarotkamera für Schub- und Zugflanke erfasst, positionsgetreu der Zahn-Geometrie zugeordnet und dann Lage und Form des Abdrucks analysiert.

Systemarchitektur und Messaufbau

Das Prüfsystem besteht aus einem automatisierten Last-Prüfstand mit Antriebseinheit, einer Wärmebildkamera sowie zugehöriger Sensorik (vgl. Abb. 2: Aufbau der Messzelle mit Kamera und Antriebseinheit). Das zu prüfende Getriebe wird zwischen Antrieb- und Abtriebseite mit Drehmomentaufnehmer montiert und unter definiertem Drehmoment betrieben. Die Infrarotkamera ist so ausgerichtet, dass sie die im Eingriff befindlichen Zahnflanken eines Zahnrads erfasst. Die synchronisierte Steuerungs- und Auswertesoftware koordiniert alle Komponenten. So wird sichergestellt, dass die Kamera definierte Sequenzen aufnimmt während die Antriebsmotoren entsprechend gesteuert werden. Gleichzeitig verarbeitet die Software die aufgenommenen Wärmebilder; die Messdaten werden in Echtzeit analysiert und stellen somit eine relevante Regelgröße für vorgelagerte Fertigungs- und Montageprozesse dar.

Objektive Auswertung und Erkennung des Tragbilds

Der Auswerteprozess der thermografischen Tragbildprüfung lässt sich in vier Schritte gliedern, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Ziel ist es, aus den aufgenommenen Thermogrammen ein objektives und quantitativ messbares Abbild des tatsächlichen Tragbilds zu gewinnen.

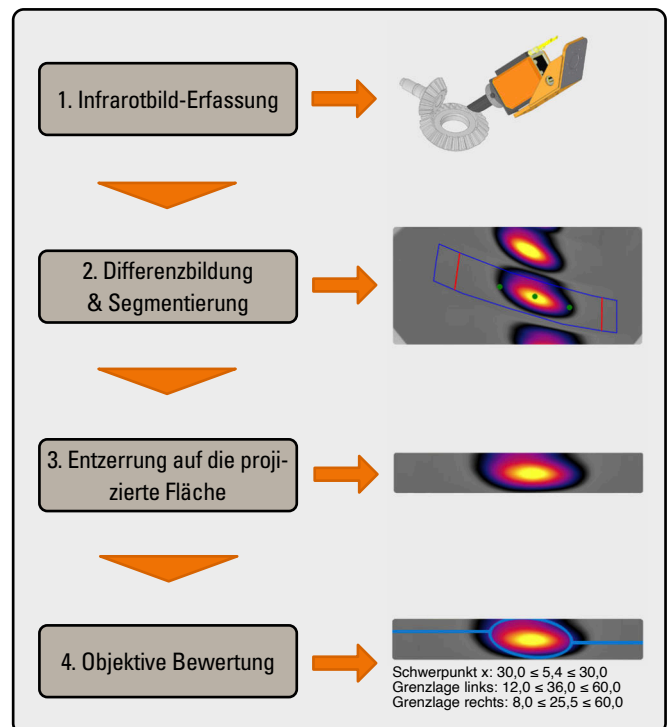


Abb. 3 Ablauf der Thermografischen Tragbildauswertung

1. Erfassung

Zunächst werden die Rohbilddaten der Zahnflanken im IR-Bereich in verschiedenen Lastzuständen aufgenommen. Diese Datensätze bilden die Grundlage für die spätere Differenzberechnung.

2. Differenzbildung und Segmentierung

Im darauffolgenden Schritt werden die Messungen miteinander verglichen. Durch eine Differenzberechnung werden Hintergrundanteile eliminiert, sodass die kontaktbedingten Temperaturerhöhungen resultieren. Die Differenzbilder offenbaren die Bereiche, in denen die Zahnflanken tatsächlich in Kontakt standen. Anschließend erfolgt die Segmentierung relevanter Flächen: Ein Algorithmus erkennt die tragenden Bereiche innerhalb der Region of Interest (ROI) auf der Zahnflanke und trennt sie von nichttragenden Bereichen.

3. Entzerrung auf die projizierte Fläche

Da die Zahnflanke aufgrund ihrer Krümmung und der Kameraperspektive verzerrt erscheint, wird das segmentierte Tragbild rechnerisch entzerrt. Diese geometrische Projektion überträgt das erkannte Tragbild auf eine plane Fläche, die der realen Zahnflankengeometrie entspricht. Somit kann das Tragbild metrisch analysiert und mit CAD-Daten oder Sollkonturen verglichen werden.

4. Objektive Bewertung und Merkmalsextraktion

Im letzten Schritt werden aus der entzerrten Fläche die relevanten Kennwerte automatisch berechnet. Dazu zählt insbesondere die Schwerpunktlage des Tragpunktes relativ zur Zahnflanke. Anhand festgelegter Sollwerte und Toleranzgrenzen entscheidet der Algorithmus, ob das Getriebe den Anforderungen entspricht.

Vorteile der thermographischen Tragbildprüfung

Temperaturdaten lassen sich quantitativ auswerten, was Wiederholgenauigkeit und Vergleichbarkeit ermöglicht. Zudem erreicht die Thermografie eine sehr hohe Empfindlichkeit und Auflösung: Selbst feine Kontaktabweichungen werden als Temperaturunterschied sichtbar, je nach Zahngröße mit submillimeter Präzision. Weiterhin erlaubt die Thermografie eine Einzelauswertung jeder einzelnen Zahnpaarung, welche individuell ausgewertet werden, anstatt nur einen Gesamtabdruck zu erhalten. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf mögliche Geräuschbildungen.

Thermografische Tragbildprüfungen sind wesentlich schneller als eine manuelle Tragbildprüfung, sowohl im Vor- und Nachbereiten als auch im Hinblick auf die Messzeit. Dies ermöglicht 100%-Kontrollen in der Serienfertigung. Die Automatisierung reduziert den Personalaufwand für die Prüfungsdurchführung, Kosten für Arbeitszeit und Verbrauchsmaterialien (Farbe, Reiniger) entfallen.

Automatisierung und Dokumentation

Jedes Prüfergebnis liegt bei der Thermografie automatisch in digitaler Form vor und kann lückenlos dokumentiert werden. Das schafft Rückverfolgbarkeit und bietet eine Regelgröße für vorgelagerte Fertigungsschritte, ebenso lassen sich Trends oder Muster erkennen. Die automatische Auswertung der Thermogramme garantiert eine stringente Bewertung nach festen Kriterien. Der Auswertalgorithmus entscheidet, ob ein Tragbild innerhalb der Toleranz liegt. Insgesamt wird die Tragbildprüfung damit vom manuellen Prüfvorgang zu einem digital integrierten Prozessschritt, der sich auch für Optimierung des Fertigungsprozesses verwenden lässt.

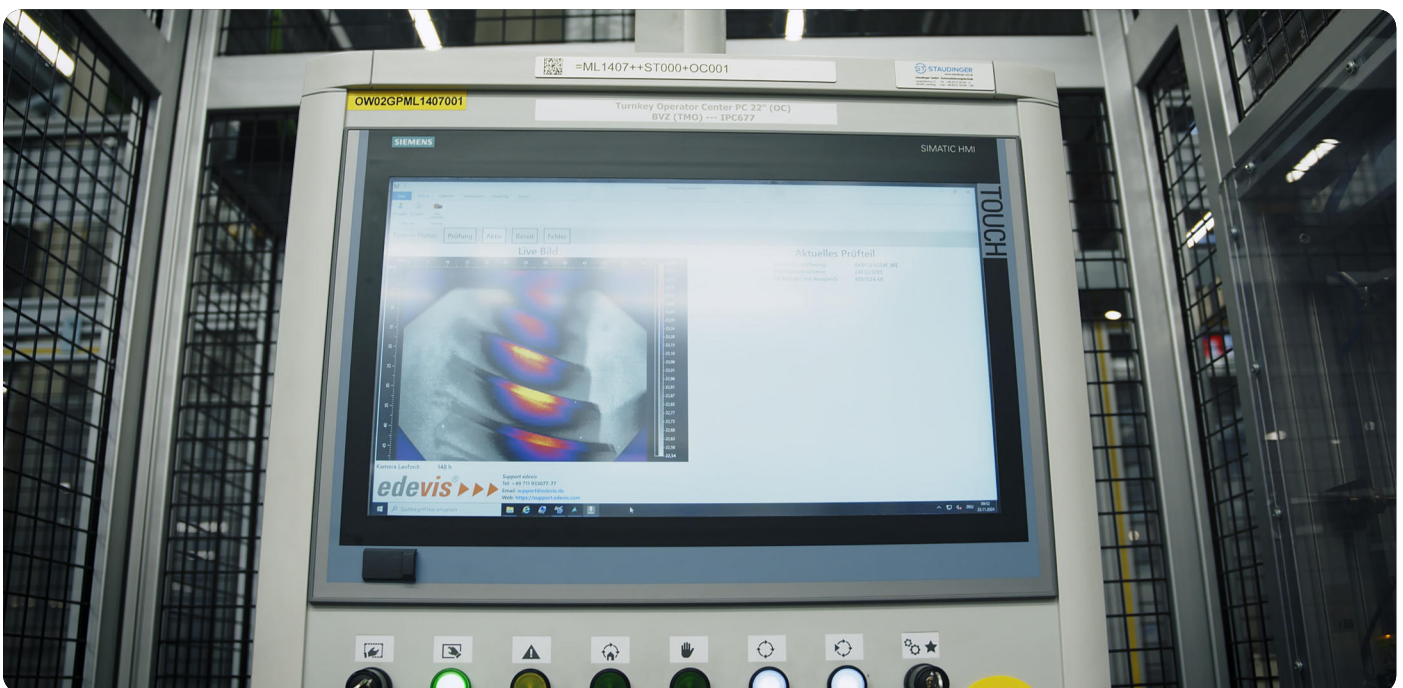


Abb. 4 Live-Ausgabe der thermografischen Ergebnisse



Abb. 5 Prüfanlage von Außen

Integration in bestehende Prozesse

Die thermografische Tragbildprüfung ist inline-fähig und lässt sich in bestehende Fertigungslinien integrieren. Um beide Flanken zu prüfen – die Zugflanke und die Schubflanke – wird das Getriebe in beiden Drehmomentrichtungen belastet. Dafür ist ein Antriebskonzept erforderlich, das sowohl antreibende als auch bremsende Last aufbringen kann. Sollen Zug- und Schubflanke getrennt erfasst werden, ist zusätzlich ein Handling-System – etwa ein 6-Achs-Roboter – erforderlich, um die Kamera für jede Flankenrichtung neu zu positionieren. Wird nur eine Flanke betrachtet, kann dieses Handling entfallen. In geschlossenen oder sehr komplexen Baugruppen können daher konstruktive Anpassungen oder zusätzliche optische Komponenten wie Spiegel oder IR-Fenster notwendig werden. Da metallische Oberflächen IR-Strahlung reflektieren und Fremdwärmequellen das Messbild verfälschen, ist der Prüfbereich thermisch abgeschirmt. Eine gezielte Kapselung der Messzone entkoppelt die Infrarotmessung von äußeren Störeinflüssen und stellt reproduzierbare Messbedingungen sicher.

Auch wirtschaftlich sollten bestimmte Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Durch die hohe Prüfgeschwindigkeit lohnt sich die Integration besonders bei mittleren bis hohen Stückzahlen oder bei komplexen Baugruppen. Bei sehr kleinen Serien oder einfachen Bauteilen kann die klassische Methode ausreichend sein. Typischerweise ersetzt die Thermografie-Station einen manuellen Prüfstand und kann an dessen Stelle oder platzsparend dort installiert werden, wo ein konventioneller Prüfstand nicht unterzubringen wäre. Mit frühzeitiger Planung bezüglich Bauraum, Taktzeit und Schnittstellen läuft das System nach der Einrichtung stabil und zuverlässig.

Fazit

Die thermografische Tragbildprüfung schließt eine Lücke, die klassische Tuschiervverfahren strukturell nicht schließen können: Sie liefert objektive, reproduzierbare Ergebnisse – flankengenau, rückstandsfrei und taktzeitauglich für die Serienproduktion. Wo manuelle Prüfmethoden an Subjektivität, Reinigungsaufwand und fehlender Automatisierbarkeit scheitern, ermöglicht das Thermografiesystem von edevis eine 100-%-Prüfung unter realen Lastbedingungen.

Die Technologie ist heute im Automobilbereich produktiv im Einsatz. Mit wachsenden Anforderungen an Verzahnungsqualität in Nutzfahrzeugen, Industriegetrieben und Energieanlagen wächst auch das Anwendungspotenzial – überall dort, wo Drehmoment zuverlässig übertragen werden muss und Ausfälle kostspielig sind.

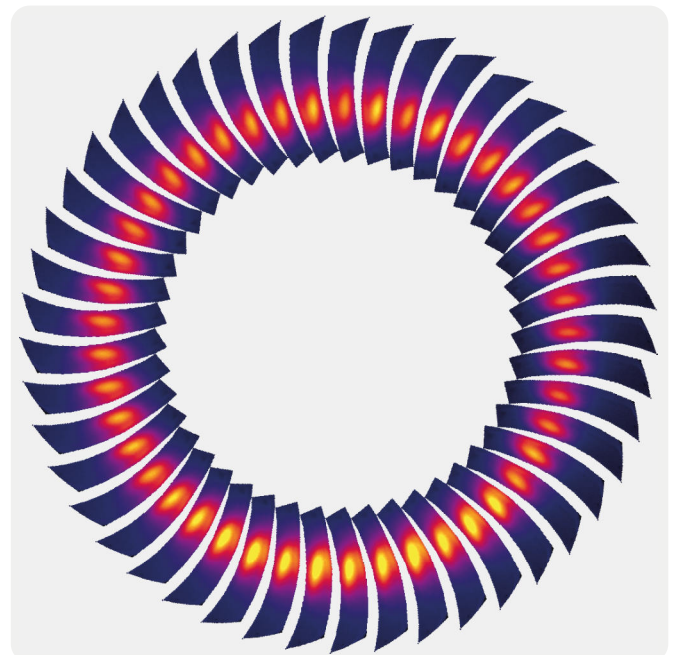


Abb. 6 Tragbildflächen

Technische Spezifikationen

Prüfkopf	
Gewicht	5,5 kg
Abmessungen	(410 x 145 x 175) mm
Flansch	Schnellwechselflansch für Roboter/Achse
Datenübertragung	Gigabit Ethernet
Infrarotkamera	
Maximale Frame-Rate	280 fps
Sichtbereich	21°
Thermische Auflösung (NETD)	20 mK
Sensorauflösung	640 x 512 px
Spektralbereich	3-5 µm
Betriebsparameter	
Typische Messdauer	10 Sekunden (typisch), plus Handlingszeiten
Verzahnungen	u.A: Hypoid und Evolventen-Verzahnung
Verzahnungs-Beschichtung	gebondert oder blank/geschliffen
Material	Stahl, Aluminium, Kunststoff
Maximale Kabellänge	30 Meter zwischen Prüfkopf und Schaltschrank
Schnittstelle zur Steuerung	ProfiNet, OPC UA, TCP/IP, andere auf Anfrage

Beispielhafte Ergebnisdarstellung der thermografischen Tragbildauswertung

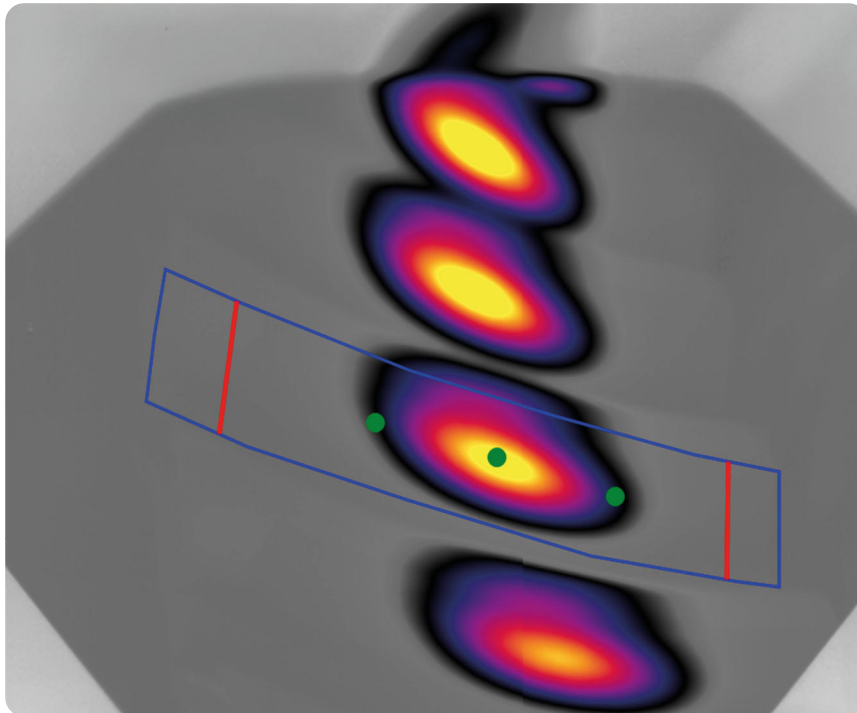


Abb. 7 Ergebnisbild

Schwerpunkt x: $-30,0 \leq 5,4 \leq 30,0$
Grenzlage links: $12,0 \leq 36,0 \leq 60,0$
Grenzlage rechts: $8,0 \leq 25,5 \leq 60,0$

Die Abbildung 7 zeigt eine exemplarische Auswertung eines thermografisch ermittelten Tragbildes. Dargestellt ist die berechnete Schwerpunktlage sowie die Grenzlagen in x-Richtung. Die angegebenen Werte dienen der Veranschaulichung des Auswertepinzips und stellen keine allgemein gültigen Grenzwerte dar.



edevis – enhanced defect visualization

Die edevis GmbH mit Sitz in Leinfelden-Echterdingen ist seit 2004 auf bildgebende, zerstörungsfreie Prüfung mittels aktiver Thermografie spezialisiert. Das Unternehmen entwickelt und liefert Prüfsysteme für die Werkstoff- und Bauteilinspektion – von der Machbarkeitsstudie bis zur vollintegrierten Serienanlage.

Die Anwendungsfelder umfassen die Prüfung von Faserverbundstrukturen, Rissprüfung an metallischen Bauteilen sowie die Inspektion von Schweiß- und Fügeverbindungen.

In eigenen Prüflaboren können Kunden Technologien mit geringem Aufwand evaluieren, bevor sie in die Serienprüfung gehen. Ergänzend bietet edevis Schulungen zu Systemen und Verfahren – im Haus wie beim Kunden vor Ort.

Die Prüfsysteme sind heute in Automotive, Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Anlagenbau sowie Forschung und Entwicklung im Einsatz.

www.edevis.de

Kontakt

edevis GmbH

Wilhelm-Haas-Straße 2
70771 Leinfelden-Echterdingen
Tel. +49 711933077-20
www.edevis.de



mehr erfahren



Copyright 2026 edevis GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Dokument dient lediglich der Information. edevis übernimmt keine Haftung für die in diesem Dokument enthaltenen Informationen – ungeachtet ob explizit oder implizit. Die Inhalte spiegeln die Auffassung von edevis zum Zeitpunkt der Publikation wider. Trotz der gewissenhaft und mit größter Sorgfalt ermittelten Informationen und Daten besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und/oder Aktualität. Vervielfältigungen, auch auszugsweise, bedürfen unserer schriftlichen Genehmigung.