

Thermographische Tragbildprüfung in der Großserienfertigung von Achsgetrieben.

Stefan GERDHENRICHS¹, Daniel BUSCHMANN², Johannes FREY³,
Robert H. SCHMITT^{2,4}

¹ BMW Group, Dingolfing

² Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Aachen

³ edevis GmbH, Stuttgart

⁴ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik IPT, Aachen

Kontakt E-Mail: stefan.gerdhenrichs@bmw.de

Kurzfassung. Zur automatisierten und objektiven Tragbildprüfung von Achsgetrieben in der Großserienfertigung bedarf es neuartiger Verfahren, die den klassischen visuellen Prüfprozess mittels Farbauftrags von ölbasierten Lacken ersetzen. Thermographische Verfahren ermöglichen es, lastbedingte Temperaturunterschiede als Wärmeabdruck an den Kontaktflächen von Zahnradpaarungen als Tragbild aufzuzeichnen. Das thermographische Tragbild kann mit geringerem Aufwand und höherer Schnelligkeit aufgezeichnet werden als mittels eines Farbauftrags. Da bei der thermographischen Vermessung jede Kontaktfläche direkt und individuell vermessen werden kann, ist eine Auswertung der Einzelabdrücke als auch des gemittelten Summentragbilds möglich. Bei der Tragbildprüfung gilt es die Kontaktflächen zwischen zwei Verzahnungspartnern zu analysieren, um die Funktionalität der Verzahnung hinsichtlich Qualitätsmerkmalen, wie zum Beispiel Akustik und Festigkeit, zu bewerten. Die Überprüfung erfolgt in der End-of-Line Kontrolle bei der Montage von Achsgetrieben. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein Messaufbau zur automatisierten Tragbildprüfung in der Großserienfertigung von Achsgetrieben mittels Thermographie vorgestellt. Dazu wird sowohl der konkrete Messaufbau beschrieben als auch die Messsicherheit des Verfahrens über eine Messsystemanalyse bewertet. Hierbei wird gezeigt, dass mit thermographischen Verfahren die klassische Überprüfung mit Farbauftrag ersetzt werden kann und dies, bedingt durch eine höhere Automatisierbarkeit, zu einem effektiveren und effizienteren Prüfprozess von Achsgetrieben führt. Über die Auswertung von thermographischen Tragbildern wird es möglich, die Streuung und Stabilität der Produktionsqualität zu bewerten sowie Einflussgrößen aus Vorprozessen zu ermitteln. Durch die Rückführung der Ergebnisse können dabei sowohl die Prozess- als auch die Produktqualität optimiert werden, indem die Informationen beispielsweise im Auslegungsprozess oder der Verzahnungsentwicklung genutzt werden.

Einleitung

Unterschiedlichste Getriebearten sind sowohl in der Industrie als auch im Alltag aus vielen Anwendungsfällen nicht mehr wegzudenken. Neben klassischen Anforderungen wie dem Wirkungsgrad und der Tragfähigkeiten steigt, getrieben durch die Elektrifizierung in der Automobilindustrie, die Relevanz von weiteren Merkmalen, wie beispielsweise dem Akustikverhalten. Bei hybriden Fahrzeugen werden beispielsweise Getriebe entgegen der ursprünglichen Auslegung für reine Verbrennungsantriebe durch Rekuperation auch im Rückwärtsgang stark belastet. Dadurch kann es zu unerwünschter Geräuschentwicklung kommen. Um frühzeitig Aufschluss über diese und die Effizienz zu erhalten, erfolgt bei der Montage der Getriebe eine sogenannte Tragbildprüfung. Die Tragbildprüfung ist ein sogenanntes Summenfehler-Messverfahren und gehört industrieseitig zu den bekanntesten Prüfverfahren zur Bewertung der Funktionalität und Qualität der Verzahnungen. Eine Normung erfolgt durch die VDI/VDE 2609. Hierbei werden Abdrücke von den einzelnen Zahnradpaaren unter Last genommen und das resultierende Bild ausgewertet. Herkömmliche Prüfungen setzen dabei auf das Auftragen von ölbasierten Lacken, um einen visuellen Abdruck zu erzeugen, der im Nachgang ausgewertet wird. [1] Ein schnelleres und aufwandsärmeres Verfahren ist hierbei die Überprüfung mittels Thermographie. Bei diesem Messverfahren wird der thermographische Wärmeabdruck der Kontaktfläche vermessen und der Temperaturverlauf untersucht, eine genaue Beschreibung erfolgt in Abschnitt 0.

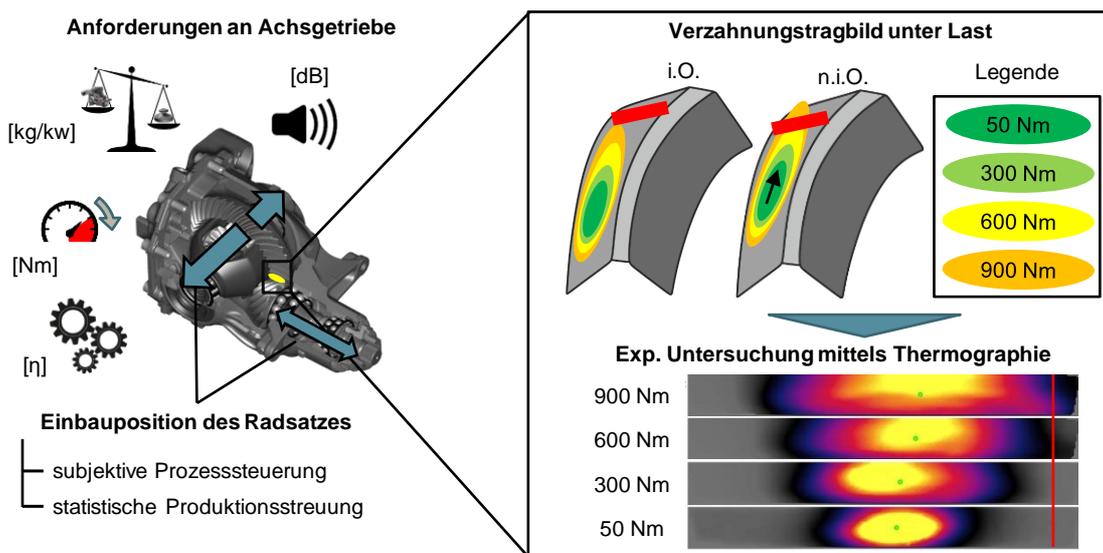


Abb. 1: Anforderungen und Einflussgrößen von Achsgetrieben

In Abb. 1 ist zum besseren Verständnis ein Achsgetriebe dargestellt mit der zu betrachtenden Flanke. Aufgeführt sind hierbei des Weiteren beispielhafte Anforderungskennzahlen, die sich an das Achsgetriebe stellen sowie Einflussgrößen, die die Qualität des Getriebes beeinflussen. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein Verzahnungstragbild unter Last abgebildet, das den Verlauf des Tragbildes bei unterschiedlichen Lasten zeigt. Von lastfreien Tragbildern spricht man hingegen, wenn die Zahnräder des Getriebes bei der Aufnahme im Eingriff sind, jedoch am Abtrieb keine Belastung anliegt. Darunter befindet sich die dazugehörige Aufnahme mittels Thermographiekamera. Bei dem betrachteten Achsgetriebe handelt es sich um Hypoidgetriebe. Diese bestehen aus achsversätzen Kegelrädern, wobei das kleinere Antriebskegelrad das größere Tellerrad antreibt.

Abb. 2 zeigt einen Zahn eines schrägverzahnten Tellerrads. Die Innenseite des Zahns wird als Zehe, die Außenseite als Ferse bezeichnet. Die konvexe Flanke wird als Zugflanke bezeichnet, die andere als Schubflanke. Für das Antriebskegelrad ist letztere Zuordnung umgekehrt.

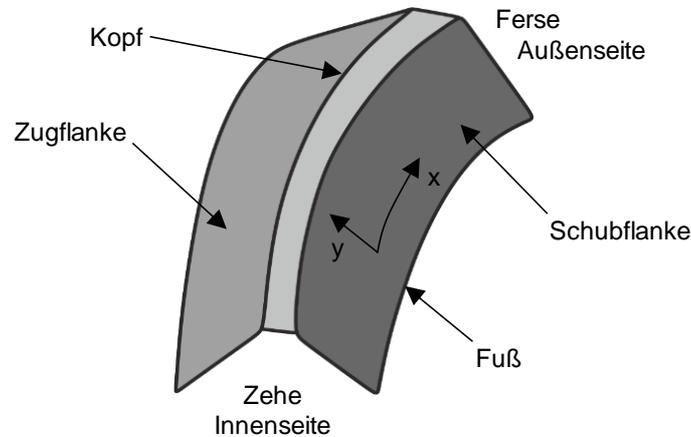


Abb. 2: Schematische Abbildung des Zahns eines Tellerrades

Die Messung der Tragbildkennwerte mittels Thermographie sowohl auf der Zug- als auch der Schubflanke erfolgt in vier Schritten. Zunächst erfolgt die Erfassung der thermografischen Aufnahme, dann eine Segmentierung der Aufnahme im Anschluss erfolgt die Entzerrung der segmentierten Aufnahme und zuletzt die Berechnung der Kennwerte und Merkmale zur Beschreibung der Eigenschaften des Tragbildes. Der beschriebene Ablauf ist in Abb. 3 dargestellt.

Im Rahmen des Beitrages wird im Folgenden die technische Entwicklung im Stand der Technik dargestellt und im Anschluss das thermographische Prüfverfahren mit dem konkreten Messaufbau erläutert sowie im Anschluss die Messunsicherheit im Vergleich zu bisherigen Verfahren bewertet. Zuletzt erfolgen ein kurzer Ausblick und ein abschließendes Fazit.

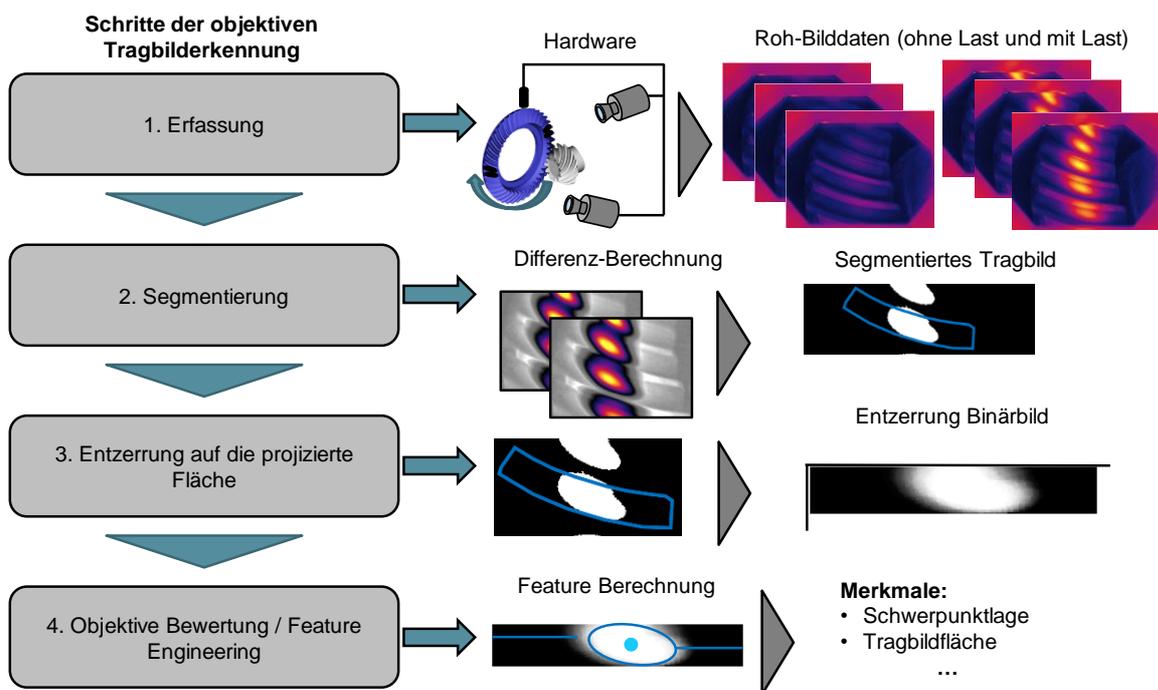


Abb. 3: Prinzipieller Ablauf von der Bildaufnahme bis zur Berechnung Tragbildkennwerte

1. Stand der Technik

Es liegen bereits viele erforschte Ansätze zur thermographiebasierten Prüfung von Zahnrädern vor. GRABSCHIED entwickelt eine Laufprüfmaschine für Kegelradverzahnungen mit thermographischer Tragbilderfassung. Die Auswertung der mittels Infrarotdetektor aufgenommenen Tragbilder erfolgt durch Mittelwertbildung von acht Aufnahmen des Zahnes, von dem ein lastfreies Bild subtrahiert wird. Zudem erarbeitet er Tragbildparameter, anhand derer das Tragbild beschrieben werden kann. [2] Aufbauend auf GRABSCHIED entwickelt NEUMANN eine auf die Bedürfnisse der Thermographieprüfung abgestimmte Infrarotkamera. Zur Verbesserung des thermographischen Kontrastes erhöht NEUMANN die Belastung des Getriebes während der Prüfung. [3]

Mit dem Patent *Verfahren zur thermographischen Tragbildprüfung einer Zahnradpaarung* wird erstmals ein Messsystem zur thermographischen Tragbildprüfung vorgestellt, das für den industriellen Einsatz geeignet ist [4]. Mittels Sprühbeölung wird das Fressen, welches insbesondere bei höheren Lasten – wie von NEUMANN eingeführt – auftritt, reduziert, um Schädigungen der Zahnflanke während der Prüfung zu vermeiden. Zur verbesserten Identifikation der Kopfkante wird die Verwendung von Wärmebeziehungsweise Kälteelementen empfohlen, wodurch sich ein höherer Temperaturkontrast ergibt. Durch die Ermittlung der Schwerpunktkoordinate des Tragbildes wird das Einlaufverhalten, das nach mehreren Umdrehungen in ein stationäres Verhalten übergeht, sichtbar.

ZHANG wiederum ermittelt Stellen im Herstellungsprozess, die sich für eine Tragbildprüfung besonders eignen. Zum einen ist dies die Prüfung auf einer Laufprüfmaschine, zum anderen am Ende der Getriebemontage, um Montageeinflüsse berücksichtigen zu können. Die Messung der Tragbilder erfolgt bei ZHANG anders als bei den übrigen dargestellten Verfahren nicht thermographisch, sondern mittels Aufnahme von Tuschiertagbildern nach Farbauftrag auf dem Zahnrad. Weiterhin führt ZHANG umfangreiche Untersuchungen durch, um das von ihm entwickelte Messsystem zur Serienreife zu führen. [5]

2. Aktuelles Funktionsprinzip zur thermographischen Tragbildprüfung

Zur Beschreibung des Funktionsprinzips und des Messaufbaus zur thermographischen Tragbildprüfung, wird zunächst der Aufbau der Messstation dargestellt und beschrieben und im Anschluss der Ablauf von der Bildaufnahme bis zur Berechnung der Tragbildkennwerte aufgezeigt.

Die Messstation verfügt über zwei Elektromotoren, einer auf der Antriebsseite mit zusätzlichem Drehmomentsensor um die genaue Einhaltung der geforderten Drehmomente zu gewährleisten, ein zweiter auf der Abtriebsseite, um die beiden vorhandenen Abtriebe mittels Riemen und Welle auf eine konstante Drehzahl zu bringen. Für die thermographische Erfassung ist die Kamera auf einem Roboter montiert, um je nach vorliegendem Getriebe eine optimale Position zur Bildaufnahme für die Schub- und Zugflanke auf dem Tellerrad zu ermöglichen. Die Kamera ist zusätzlich mit einem Schutztrichter ausgestattet, der die Aufnahme vor Fremdstrahlungen und anderen Wärmequellen außer der Station schützt. Des Weiteren wird der Trichter durch die Kamera erwärmt was zu einer gewissen Temperaturstrahlung führt und somit die Sichtbarkeit der Verzahnung steigert. Diese weist ansonsten eine homogene Temperatur auf, sodass man diese in der thermographischen Aufnahme nicht erkennen würde.

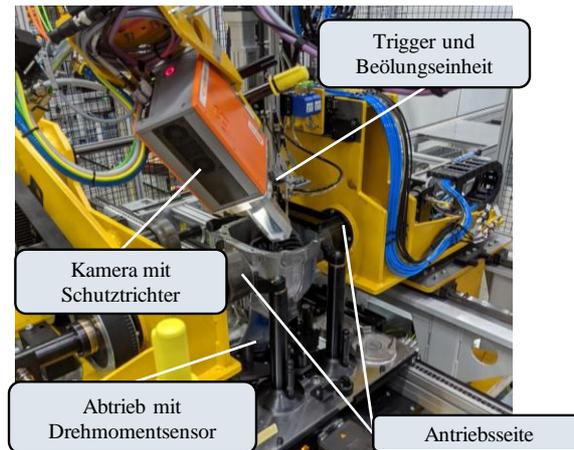


Abb. 4: Aufbau der Messstation in der Achsgetriebemontage und eingesetzteameratechnik

Für die Messung wird der Detektor der Kamera (Typ siehe Tabelle 1) aktiv gekühlt, um hohe Frameraten bei gleichzeitig niedrigem Rauschen zu ermöglichen. Die Bildauflösung ist deutlich geringer gewählt als bei klassischen Industriekameras, jedoch wird bei Verwendung der vollständigen Bilddiagonalen eine Auflösung von 0,1 mm pro Pixel erreicht, was sich als ausreichend für die bisher ermittelten Unsicherheiten über andere Systeme gezeigt hat [5, 6]. Das Kameraobjektiv ist für die Messstation so gewählt, dass die maximale Auflösung für die zu betrachtenden Zahnflanken erreicht werden kann.

Tabelle 1: Spezifikation der eingesetzten Kameratechnik

Kamera: IRCAM VELOX 81k SM

Eigenschaft	Spezifikation
Spektralbereich	1,5 μm – 5,5 μm
Detektor-Technologie	Indium-Antimonid (InSb)
Format	81.920 (320 x 256) Pixel
NETD	< 20 mK
Vollbild-Frequenz	384 Hz
Kamera Objektiv	IRCAM M 50 (50mm)

Zur Synchronisation der Aufnahme für die vorbeilaufenden Zahnflanken wird ein Wirbelstromsensor verwendet, der als Trigger der Kamera fungiert und bei jedem Zahn auslöst. Die notwendige Beölung des Getriebes erfolgt am Anfang der Messung mit reduzierter Drehzahl über zwei Düsen, um eine gleichmäßige Beölung der Zug- und Schubflanke zu erreichen. Die richtige Ölmenge ist hierbei entscheidend, da zu wenig Öl zu einer Überhitzung des Getriebes und somit zu Fehlmessung führen kann, während zu viel Öl zu einer Ölverschleppung der Anlage führen kann, was wiederum die Fliehkräfte und das Rotationsverhalten beeinflusst. Dadurch können sich Tropfen aus dem Ölfilm lösen, die zu einer zu vermeidenden Verschmutzung der Dichtflächen führen können.

Nachdem der Aufbau der Messstation vorgestellt wurde, wird nachfolgend der Ablauf der thermographischen Tragbildprüfung von der Erfassung bis zur Berechnung der Kennwerte erläutert.

Die Erfassung des Tragbildes erfolgt, wie in Abb. 3 dargestellt, dynamisch unter Rotation. Die Synchronisation der Zahnflanke und der Kamera erfolgt dabei über einen ein eingestelltes Triggersignal. Zur Erfassung des Tragbildes wird zunächst ein lastfreier Durchlauf vermessen, mit einer Aufnahme pro Zahnflanke in der Schub- und Zugphase. Um dies nahezu lastfrei zu ermöglichen, werden die Motoren dabei so angesteuert, dass die Zahnflanken mit wenig Drehmoment auf die Nenndrehzahl beschleunigt werden. Nach der Messung im Leerlauf erfolgt die Messung mit Last. Hierbei werden zwei Durchläufe je Last vermessen, mit jeweils zwei Aufnahmen pro Zahn. Da sich das vorgegebene Drehmoment

nur mit Verzögerung einstellen lässt, werden die Messungen hierbei erst gestartet, wenn das Drehmoment konstant der Sollvorgabe für den Messpunkt entspricht.

Nach der Erfassung des Tragbildes erfolgt die Segmentierung. Hierbei werden, über die Aufnahme im Leerlauf und den beiden unter Last, für jede Zahnflanke Differenzbilder berechnet, sodass die Bereiche mit einer Temperaturänderung sichtbar werden und Umgebungseinflüsse eliminiert werden. Basierend hierauf, kann zur Segmentierung eine Bildtransformation mittels eines festgelegten beziehungsweise statistisch ermittelten Schwellwerts erfolgen, um die Aufnahme in Binärbilder zu überführen. Über die Binärbilder kann dann die „Region of Interest“ (ROI) festgelegt werden, die als Bewertungsreferenz für die segmentierte Fläche genutzt und für die Bestimmung der Kennwerte analysiert wird.

Zur letztendlichen Auswertung der segmentierten Fläche ist noch eine Entzerrung der Aufnahme erforderlich. Dafür muss der geometrisch gewölbte Zahn (siehe Abb. 3) auf die projizierte Fläche der Zahnflanke entzerrt werden. Um dies zu erreichen, erfolgt zunächst eine Transformation aller Pixel innerhalb des ROI in Polarkoordinaten (Radius und Winkel), um diese im Anschluss in einer 2D-Ebene zu übertragen. Basierend auf der entzerrten Aufnahme erfolgt dann die eigentliche Berechnung der gesuchten Größen.

Zur Berechnung von Kennwerten zur Beschreibung der Eigenschaften des Tragbildes werden aus der entzerrten Aufnahme verschiedene Merkmale extrahiert. Dies umfasst zum Beispiel die mittlere und maximale Temperatur, unterschiedliche Lageparameter (bspw. Schwerpunkt und Extremposition) sowie eine Aggregation der Kennwerte je Belastung nach Zug und Schub über einen Mittelwert. Zusätzlich wird auch die Standardabweichung der Lageparameter ermittelt, um bewerten zu können, ob eine Tragbildwanderung bzw. ein Rundlauf vorliegt.

3. Vergleich zu bisherigen Verfahren

An die Darstellung des Funktionsprinzips der thermographischen Tragbildprüfung und die Beschreibung der Messstation schließt sich ein Vergleich mit bisherigen Messverfahren an. Hierzu wird zunächst die Wiederholgenauigkeit betrachtet und gegenübergestellt. Anschließend folgt eine detaillierte Betrachtung der Messergebnisse der thermographischen Tragbildprüfung.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. stellt die Wiederholgenauigkeit des bisherigen Verfahrens, angelehnt an ZHANG, und der thermographischen Tragbildprüfung gegenüber. Dargestellt ist die Streuung der verschiedenen Parameter in Form der zweifachen Standardabweichung bei Wiederholmessungen im Rahmen einer Messsystemanalyse (MSA Typ 3). Eine Vergleichbarkeit der Verfahren ist durch gleiche Prüfbedingungen und einen analogen Aufbau der Prüfsysteme gewährleistet. Die Vergleichswerte wurden von GERDHENRICHS ET AL. aufgenommen [6]. Einziger Unterschied ist, dass anders als bei ZHANG Differenzbilder berechnet wurden. Für die thermographische Tragbildprüfung wurden 30 Bauteile jeweils zwei Mal vermessen. Da es sich um eine vollautomatisierte Messung handelt, ist kein Bedieneinfluss vorhanden. Obwohl der Abstand zwischen den beiden Einzelmessungen eine Minute betrug, war das Bauteil noch nicht vollständig ausgekühlt. Die Restwärme bei der verbleibenden Temperaturdifferenz von 0,1 Grad Celsius beeinflusst vor allem die äußeren Messwerte. Der Schwerpunkt hingegen bleibt durch die Mittelung der Werte stabil. Bei längeren Wartezeiten ist ein Wegfallen dieser Temperaturdifferenz und der dadurch bedingten systematischen Beeinflussung der Messwerte zu erwarten. Diese sind in der Fertigung jedoch nicht zu vertreten und entsprechend nicht zu erwarten.

Es zeigt sich eine stark reduzierte Streuung des Messsystems durch die Einführung der thermographischen Tragbildprüfung. Bezogen auf typische Zahnflankenbreiten von 40 –

50 mm konnte beispielsweise die beidseitige Streuung des Schwerpunktes auf der Zugflanke von mehr als vier Prozent auf etwa zwei Prozent mehr als halbiert werden. Die Streuung des Schwerpunktes der Schubflanke konnte sogar auf ungefähr ein Prozent reduziert werden. Lediglich für den dem Zentrum des Tellerrades am nächsten gelegenen Punkt des Tragbildes (Extremlage an der Innenseite der Verzahnung) ist die Streuung an der Schubflanke leicht erhöht.

Tabelle 2: Vergleich der Wiederholgenauigkeit des Verfahrens von GERDHENRICHS ET AL. mit der thermographischen Tragbildprüfung. Vergleich auf Basis der 2-Sigma Streuung verschiedener Kennwerte zur Beschreibung des Tragbildes. Die Extremlage bezeichnet den äußersten Punkt des Tragbilds in der jeweiligen Richtung.

Flanke	Parameter	Gerdhenrichs et al. 2021 [6]	Aktuelles System mittels Thermographie
Zug	Schwerpunkt x	+/- 1,01 mm	+/- 0,41 mm
Schub	Schwerpunkt x	+/- 0,84 mm	+/- 0,23 mm
Zug	Extremlage Innenseite	+/- 1,03 mm	+/- 0,32 mm
Schub	Extremlage Innenseite	+/- 0,90 mm	+/- 0,95 mm
Zug	Extremlage Außenseite	+/- 1,33 mm	+/- 0,82 mm
Schub	Extremlage Außenseite	+/- 1,52 mm	+/- 0,32 mm

Neben der im Allgemeinen deutlich geringeren Streuung der Messwerte bei der thermographischen Tragbildprüfung (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ist für die Wiederholungsmessung kein Waschprozess mit anschließendem erneutem Farbauftrag erforderlich, wodurch der Prüfaufwand signifikant reduziert wird. Auf diese Weise ist eine Inline-Prüfung mit Wiederholungsmessung möglich. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Zahnflanke vor erneuter Messung zunächst abkühlen muss. Der Wegfall des Farbauftrages verhindert Störungen aufgrund von harten Farbpigmenten. Weiterhin ermöglicht die thermographische Tragbildprüfung durch die verbesserte Berechnung der Differenzbilder eine sehr stabile Segmentierung, wodurch Umgebungseinflüsse auf die Messergebnisse weitgehend eliminiert werden.

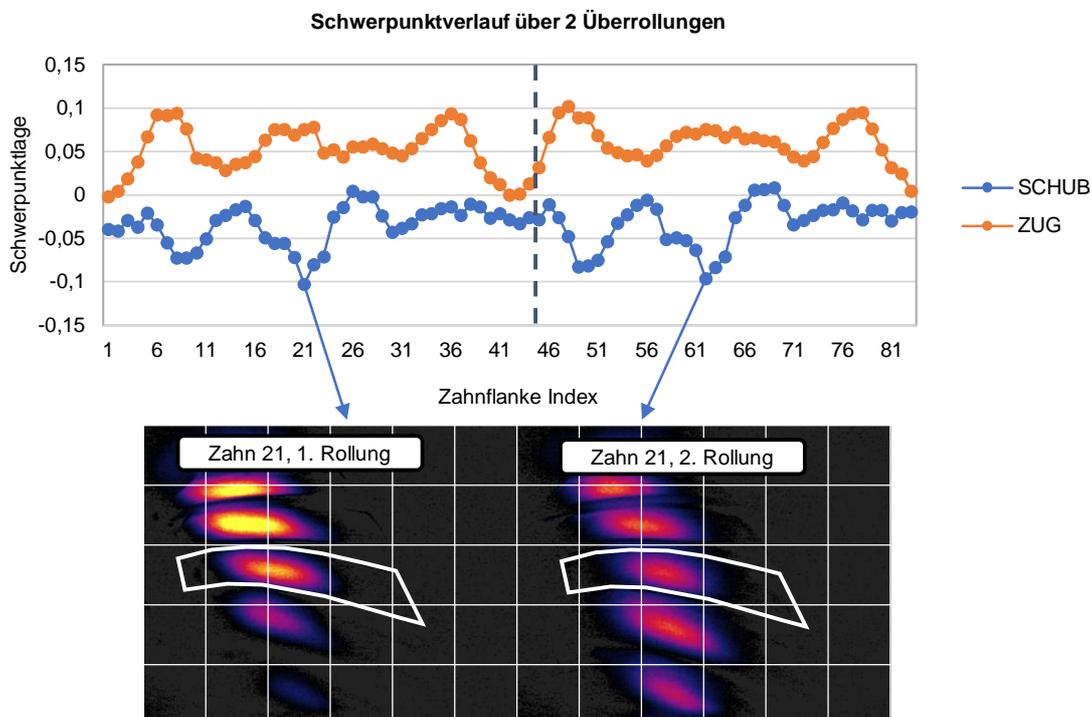


Abb. 5: Verlauf des Tragbildschwerpunkt über mehrere Überrollungen des Tellerrades

Im Anschluss an den Vergleich mit dem bisherigen Messverfahren erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse der thermographischen Tragbildprüfung. Das

Diagramm in Abb. 5 zeigt die Messung eines Tellerrads mit zwei Überrollungen unter Last. Dargestellt werden die Schwerpunkte jeder Zahnflanke für die Zug- und Schubseite. Es zeigt sich, dass die Verläufe der ersten und zweiten Überrollung ein ähnliches Verhalten aufweisen, sich das Verhalten der ersten Überrollung auf die zweite Überrollung überträgt. Im unteren Bereich der Abbildung sind die Differenzbilder eines Zahnes für die erste und zweite Überrollung dargestellt. Die Skalierung der Temperaturdifferenz ist für beide Bilder gleich gewählt. Auch hier zeigt sich, dass das Verhalten der ersten Überrollung sich auf die zweite Überrollung überträgt. Lediglich leichte Unterschiede in der Temperatur sind zu erkennen.

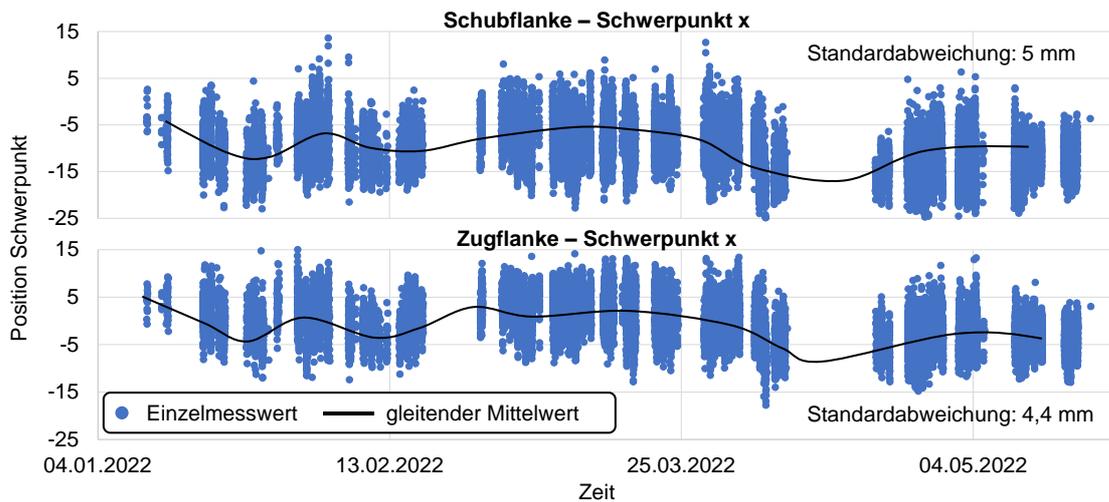


Abb. 6: Langzeitverläufe des mittels Thermographie gemessenen Tragbildschwerpunkts in Zehe-Ferse (x)-Richtung über einen Zeitraum von 5 Monaten. ($n > 20.000$ Einheiten, Prüfung in Eibaulage)

Da das aktuelle thermobagrabie-basierte System am Ende der Getriebemontage bereits im Regelbetrieb eingesetzt wird, kann eine Betrachtung der Produkt- und Prozessqualität auf Basis der Messergebnisse erfolgen. Bei der Analyse des zeitlichen Verlaufs der Schwerpunkte der Zahnflanken ist eine starke Streuung der Lage des Schwerpunktes erkennlich. Ein Abgleich der Standardabweichung des Prozesses mit der Standardabweichung des Messsystems zeigt, dass letztere weniger als 5 % der Gesamtprozessstreuung ausmacht und daher die Messunsicherheit bei der Prozessanalyse vernachlässigt werden kann. Eine Langzeitbetrachtung des gleitenden Mittelwertes (Abb. 1) zeigt, dass dieser sich deutlich verschiebt. Die Ursachen dieser Verschiebung sind aufgrund der großen Anzahl möglicher Ursachen bislang nicht abschließend geklärt.

Eine abschließende Korrelationsanalyse zur weiteren Untersuchung der Prozessschwankungen zeigt, dass ein für eine Stichprobengröße von mehr als 20.000 Einheiten starker linearer Zusammenhang zwischen den Schwerpunkten der Zug- und Schubflanke vorliegt (Abb. 7). Eine Verschiebung der Zugflanke nach rechts geht folglich mit einer Verschiebung der Schubflanke nach rechts einher und andersherum. Es gibt folglich Einflussgrößen, die beide Flanken gleichermaßen beeinflussen. Diese sind bisher noch nicht bekannt.

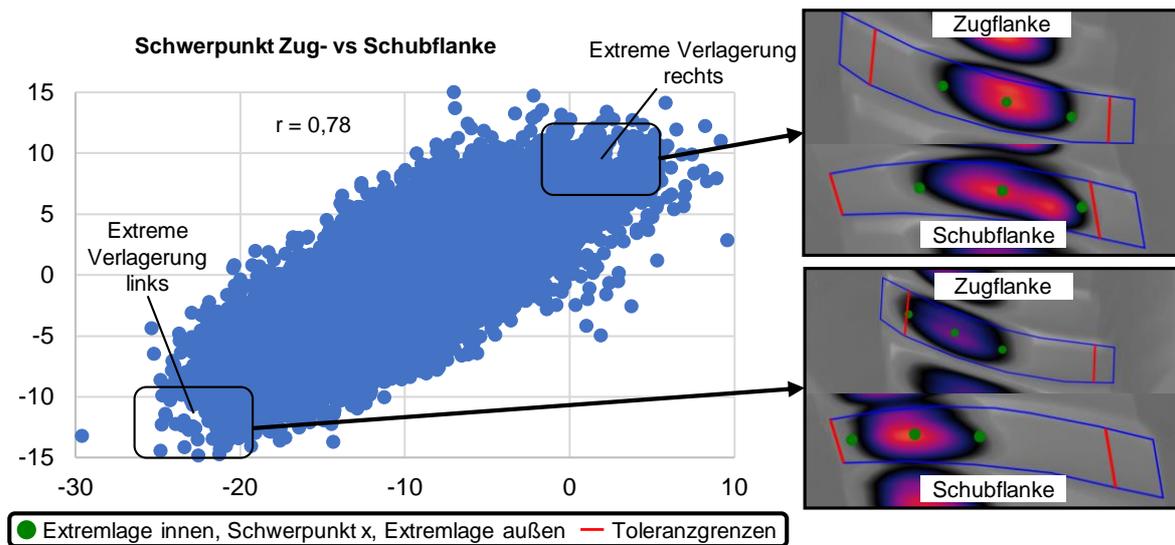


Abb. 7: Zusammenhang des Schwerpunkts zwischen der Zug- und Schubflanke basierend auf mittels Thermographie ermittelten Tragbildschwerpunkten in Zehe-Ferse (x)-Richtung ($n > 20.000$, Prüfung in Einbaulage). Die Extremlage bezeichnet den äußersten Punkt des Tragbildes in der jeweiligen Richtung. Die Verlagerung bezeichnet die Exzentrizität des Tragbildes.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend ermöglicht die thermographische Tragbildprüfung einen hochgradig automatisierten Prüfprozess von Achsgetrieben, der effektiver und effizienter ist als bisherige Verfahren, die auf dem Prinzip des Farbauftrags basieren.

In diesem Beitrag wurde zunächst der Aufbau der Messstation dargestellt, der einen Einsatz der Tragbildprüfung in der Serienfertigung ermöglicht. Basierend auf der Erfassung mit der Thermographiekamera ermöglicht die Tragbildererkennung eine objektivierte Bewertung der Tragbilder. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass im Vergleich zu bisherigen Prüfmethoden die Streuung der Schwerpunkte der Tragbilder mehr als halbiert werden konnte und im Vergleich zur Prozessstreuung vernachlässigt werden kann. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass unbekannte Prozesseinflüsse die Lage des Tragbildes auf Zug- und Schubflanke zugleich beeinflussen. Die Ermittlung und zielgerichtete Beeinflussung dieser Einflussgrößen ist das Ziel zukünftiger Untersuchungen. Auf dieser Basis kann die Verzahnung im Getriebe so positioniert werden, dass eine optimale Lage des Tragbildes erreicht und die Prozessstreuung reduziert wird.

Referenzen

- [1] Richtlinie VDI/VDE 2609: „Ermittlung von Tragbildern an Verzahnungen“. VDI, Düsseldorf, 2000.
- [2] Grabscheid, J.: „Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung“. Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre. Dissertation, Universität Stuttgart, 1989.
- [3] Neumann, G.: „Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern“. Institut für Maschinenelemente. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [4] Bürkle, H.; Lörcher, C.: Verfahren zur thermographischen Tragbildprüfung einer Zahnradpaarung. Patent DE102012014798 A1. 2014.
- [5] Zhang, H.: „Fertigungsintegriertes Messsystem zur Qualitätsprüfung und -regelung in der Serienproduktion von Kegelradgetrieben“. Dissertation, RWTH Aachen, 2018.
- [6] Gerdhenrichs, S.; Chhor, J.; Schmitt, R.H.: Objektivierung der Tragbildprüfung/New Measurement Strategy for Quality Assurance of Lapped Hypoid Gear – Objectification of Contact Pattern Test. wt Werkstattstechnik online 111, Nr. 6 (2021). 464-468.