

# Untersuchungen zur spanenden Bearbeitung mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsthermografiekamera

Reiner ZIELKE, Hans-Georg RADEMACHER, Horst-Artur CROSTACK,  
Technische Universität Dortmund  
Steffen REICH, Heiko FRANK,  
Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden

**Kurzfassung.** Bei der spanenden Bearbeitung entsteht am Werkzeug, im Bauteil aber auch im abgetrennten Span Wärme. Diese kann die Materialeigenschaften des Werkzeugs und des Bauteils beeinflussen. Zur Reduzierung dieses Einflusses wird versucht, die Wärme überwiegend über den Span abzuführen. Hierzu wird das Werkzeug durch Beschichtung und Variation der Schneidengeometrie angepasst. Um den Einfluss der Beschichtung aber auch der Schneidenform und der Schneidparameter, wie z. B. die Schnittgeschwindigkeit, auf die Wärmeentwicklung zu beurteilen, sind Thermografiemessungen notwendig. Im Fall der spanenden Bearbeitung ist auf Grund der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit eine Hochgeschwindigkeitsthermografiekamera sinnvoll, da so der Schneidprozess und die auftretenden Temperaturen im Werkzeug, im Bauteil und im Span gemessen werden können. An Hand der Ergebnisse können dann Parameter bestimmt werden, um eine schnelle und materialschonende Bearbeitung zu realisieren.

Im Beitrag werden erste Untersuchungen zum Spanprozess präsentiert, wobei der Einfluss von Prozessparametern und Beschichtung auf die erzeugte Wärmeverteilung untersucht wird. Dabei stehen die experimentelle Anordnung sowie die eingesetzten Auswertemethoden im Vordergrund.

## 1. Einführung

Die hier durchgeführten Arbeiten wurden vom Lehrstuhl für Qualitätswesen (LQW) der Technischen Universität Dortmund zusammen mit der Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V. (GFE) durchgeführt. Der Schwerpunkt der GFE lag bei der Auswahl von Schneidmaterial und -geometrie, Bearbeitungsmaschine und -parameter, des zu bearbeitenden Werkstoffs und der Durchführung der Spanexperimente. Die Arbeiten des LQWs konzentrierten sich auf die Messtechnik zur flächenhaften Bestimmung der Wärmeverteilung während des Bearbeitungsprozesses, wobei neben einer hohen Messgenauigkeit auch eine hohe Zeitauflösung angestrebt wurde.

Ziel der Untersuchungen ist es, die beim Spanprozess auftretenden Temperaturen für die Schneide, das Werkstück sowie der abgetrennten Späne zu bestimmen. Basierend auf den Ergebnissen können dann die Schneidwerkzeuge bezüglich ihrer Effektivität bewertet werden. Die auf diese Weise bestimmten Abhängigkeiten der Temperatur von Schneidmaterial, -geometrie und Bearbeitungsparameter ermöglichen eine konsequente Weiterentwicklung der Schneiden und eine optimale Anpassung der Bearbeitungsparameter, um eine hohe Schneidleistung und gleichbleibende

Oberflächenqualität zu erhalten. Im Rahmen der Arbeiten wurden sowohl der Fräs- als auch der Drehprozess untersucht.

## **2. Prinzip der Temperaturmessung mit einer Thermokamera**

Bei den hier angestrebten Untersuchungen ist neben einer hochauflösenden Temperaturmessung auch eine hinreichend hohe Ortsauflösung notwendig, um Informationen über die Wärmeentstehung, -verteilung und -abführung an der Schneide und im Werkstück zu erhalten. Grundsätzlich kann man bei Temperaturmessungen zwischen kontaktierten und berührungslosen Messsystemen unterscheiden.

Die kontaktierten Systeme können bei diesen Untersuchungen wegen der notwendigen Kabel nur an nicht beweglichen Komponenten angebracht werden. Hier messen diese Systeme die Temperatur einer Bauteilkomponente, wobei sie keine Informationen über die Temperaturverteilung oder über die Temperatur an der Kontaktstelle zwischen Schneide und Werkstück liefern können.

Für die berührungslose Temperaturmessung werden Strahlungspyrometer eingesetzt. Diese messen die vom Objekt ausgehende elektromagnetische Wärmestrahlung. Im Planckschen Strahlungsgesetz ist der Zusammenhang zwischen der absoluten Temperatur und der pro Fläche und Wellenlänge emittierten Strahlungsleistung beschrieben. Die Lage des auftretenden Strahlungsmaximums verschiebt sich mit steigender Temperatur hin zu kürzeren Wellenlängen (Wiensches Verschiebungsgesetz). Diese Verschiebung bewirkt, dass heiße Gegenstände „glühen“. Die Wellenlängen der emittierten Strahlung liegen dann im Bereich des für den Menschen sichtbaren Lichtes. Diese Überlegungen gelten nur für einen idealen schwarzen Strahler, also einen Körper, der die gesamte auf ihn einfallende Strahlung absorbiert und nach dem Kirchhoffschen Gesetz auch wieder emittiert. Reale Körper weichen jedoch hiervon ab. Um diese Abweichungen zu berücksichtigen wird der Emissionsfaktor eingeführt. Wenn der Emissionsfaktor konstant, also unabhängig von der Wellenlänge ist, wird der Körper als grauer Strahler bezeichnet. Variiert er dagegen in Abhängigkeit der Wellenlänge, so handelt es sich um einen selektiven Strahler. Wird vor der Temperaturmessung der Emissionsfaktor des zu messenden Materials bestimmt und bei den nachfolgenden Messungen berücksichtigt, so kann die Temperatur mit hoher Genauigkeit berührungslos bestimmt werden. Das hier beschriebene Strahlungspyrometer misst die Strahlung über eine fest vorgegebene Fläche und ordnet dieser eine Temperatur zu. Eine konsequente Weiterentwicklung der Strahlungspyrometer stellt die Thermografiekamera dar. Diese misst wie das Strahlungspyrometer die elektromagnetische Wärmestrahlung, besitzt jedoch wie eine Videokamera mehrere Sensoren, so dass sie die Wärme in Form eines Bildes aufnehmen kann. Mit diesem System kann nicht nur die absolute Temperatur gemessen werden, sondern auch die am Körper auftretende Wärmeverteilung bestimmt werden.

Die im Rahmen der Arbeiten eingesetzte Thermokamera der Firma Thermosensorik zeichnet sich zum einen mit einer hohen Messauflösung von 15 mK und zum anderen mit einer hohen Aufnahmezeit von 880 Bildern (256x256 Pixel) pro Sekunde aus. Aus diesem Grunde ist dieses System zur thermischen Analyse des Spanprozesses besonders geeignet.

## **3. Versuchsaufbau und -durchführung**

Der Messaufbau für die Untersuchungen zum Drehprozess ist im Bild 1 dargestellt. Die Thermografiekamera ist mit einem Stativ an dem Meißelhalter befestigt, so dass sie sich mit dem Meißel bewegen kann. Hierdurch wird eine ortsfeste Abbildung der Schneide im Bild erreicht. Da die Schneidenspitze bzw. teilweise die komplette Schneide durch den

Span verdeckt wird (Spannester), beschränkt sich die Untersuchung auf den Span. Um die empfindliche Kamera (Objektiv) vor Spänen zu schützen, wurde vor dem Objektiv ein für die Thermokamera durchsichtiges Schutzglas aus Saphir befestigt. Zur Dämpfung der von den Spänen emittierten Strahlung, die den Detektor übersteuern würde, sind drei 2 mm starke Kunststoffplatten zwischen Schutzglas und Objektiv gelegt worden.

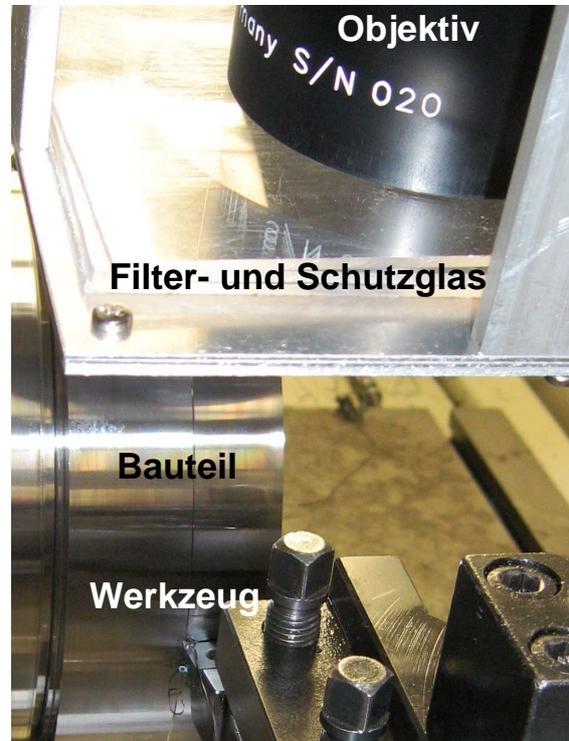
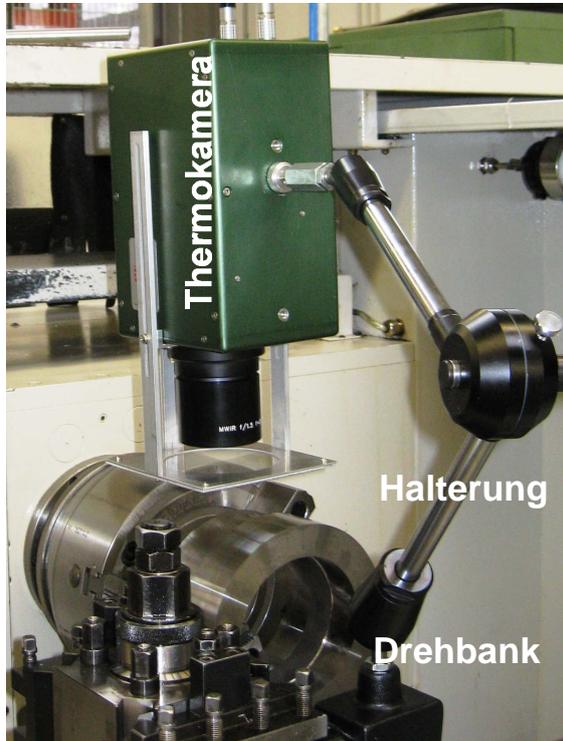


Bild 1: Messanordnung zum Drehprozess

Die Schneide wurde mit einem Temperaturfühler (Pt100) versehen, der sich jedoch auf der von der Bearbeitungszone abgewandten Seite befindet und somit nicht die an der Kontaktstelle (Schneide/Bauteil) vorliegende Temperatur misst. Dieser soll als Kalibrierpunkt für die durchzuführende Thermografiemessung dienen, im späteren Bild also eine Stelle mit bekannter Temperatur darstellen.

Der Aufbau für die Untersuchungen zum Fräsprozess zeigt Bild 2. Bei dieser Bearbeitungsanlage kann das Werkstück vor und zurück und der Fräskopf seitlich verfahren werden. Daher ist weder das Werkstück noch der Fräser während des Versuchs ortsfest. Dies führt zu einem höheren Aufwand bei der Auswertung, da das Messfenster zur Bestimmung der Temperatur manuell je nach Lage der Schneide bestimmt werden muss. Im Gegensatz dazu kann bei den oben beschriebenen Messungen zum Drehprozess das Messfenster, da die Schneide ortsfest im Thermobild ist, konstant gehalten werden. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen war der Fräser nur mit einer Schneidplatte bestückt, so dass pro Umdrehung des Fräasers nur einmal Material abgetragen wurde. Dies erlaubt es, auch eine Aussage über die Strahlungsintensität der Schneide zu machen. Dazu wird diese immer dann ermittelt, wenn sich der Fräskopf etwa eine  $\frac{3}{4}$  Umdrehung weitergedreht hat und dann für die Kamera gut sichtbar ist. Allerdings hat sich die Schneide dann schon relativ stark abgekühlt.

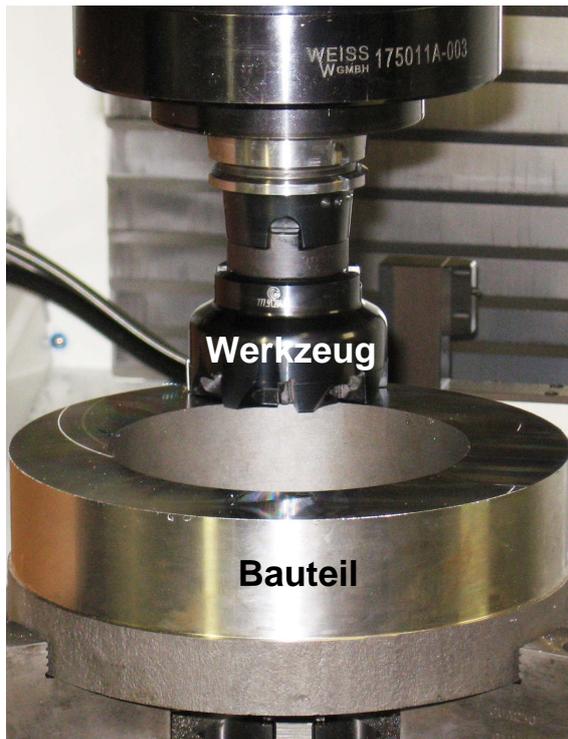


Bild 2: Messanordnung zum Fräsprozess

#### 4. Messergebnisse

Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse zum Drehprozess betrachtet. In den folgenden beiden Bildern (Bild 3) ist die Temperaturverteilung vor (linkes Bild) und während des Drehprozesses (rechtes Bild) abgebildet. Zusätzlich sind im Bild die Bearbeitungsdaten sowie die Daten der Kameraeinstellung angegeben.

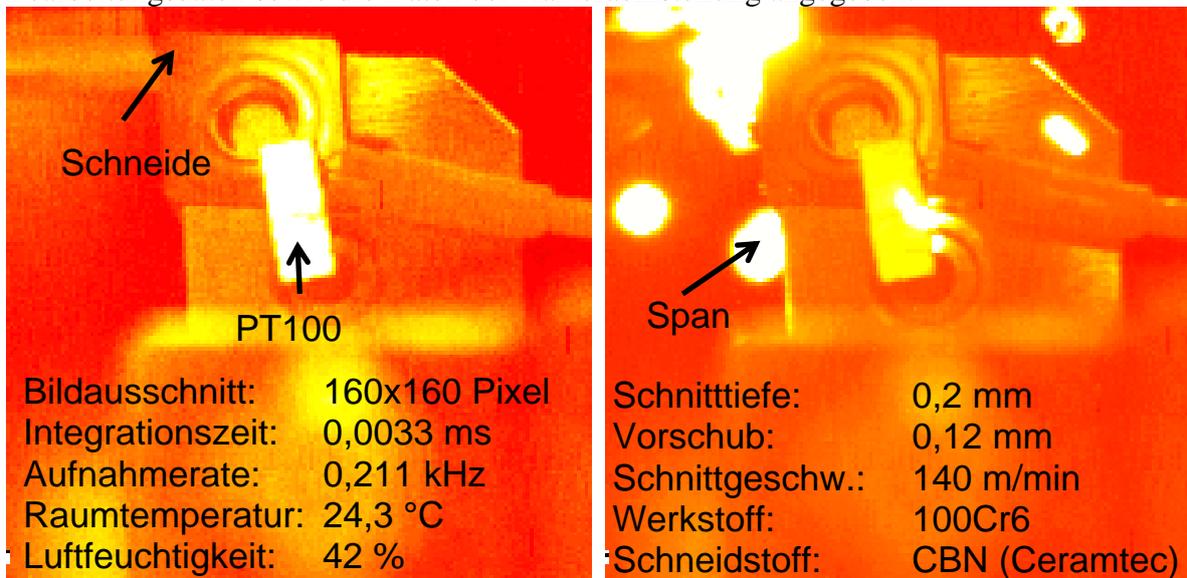


Bild 3: Temperaturverteilung vor und während des Drehprozesses

In den Bildern sind die Schneide sowie deren Halterung deutlich zu erkennen. Weiterhin sind im linken Bild die Lage des Thermoelements PT100 und im rechten Bild die abgetrennten Späne zu sehen. Hierbei geben hellere Farbwerte höhere Temperaturen wieder. Da die Späne die Sicht auf die Schneide verhindern, konnte bei diesen Untersuchungen nur die Temperatur der Späne ausgewertet werden. Hierzu wurde über die

Schneide ein Auswertefenster gelegt, welche das maximale Messsignal für jedes aufgenommene Bild ermittelt. Die so ermittelten Werte werden in Abhängigkeit der Bildnummer und somit der Zeit aufgetragen (siehe Bild 4).

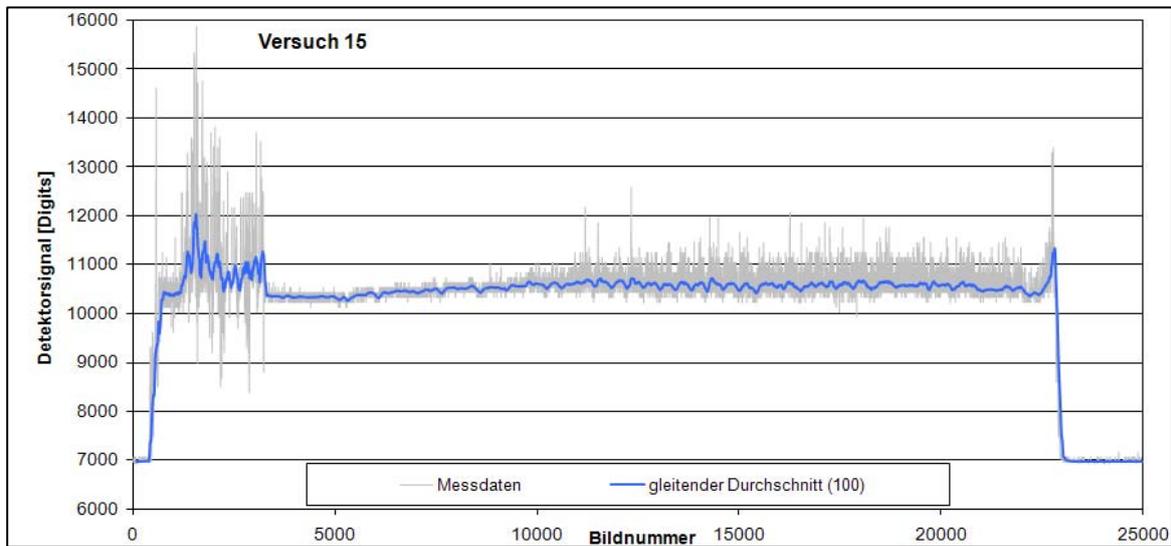


Bild 4: Wärmestrahlung der Späne während des Drehprozesses

Die Temperatur ist hier in Form des Detektorsignals in Digits angegeben. Um entsprechende Absoluttemperaturen zu bestimmen sind umfangreiche Kalibrierungen notwendig. Da hier jedoch zunächst nur Unterschiede für die verschiedenen Schneiden bestimmt werden sollten, wurde auf diese Kalibrierung verzichtet. Die unverarbeiteten Signale sind grau dargestellt, wobei zu Beginn und gegen Ende des Drehprozesses starke Schwankungen zu erkennen sind. Diese stammen von Spannestern die sich vor der Scheide gebildet haben und somit das Messsignal beeinflussen. Um diesen Störeinfluss zu reduzieren wurde ein gleitender Durchschnitt über je 100 Werte bestimmt (blaue Kurve). Weiterhin wurden zum Vergleich der eingesetzten Schneiden jeweils Messbereiche gewählt, bei denen nur wenige Spannester aufgetreten sind.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Beschichtungen und Schichtstrukturen eingesetzt, die Schneidkante wurde dabei nicht verändert und blieb im scharfen Zustand. Die eingesetzten Schichtsysteme können der Tabelle (Bild 5) entnommen werden.

Versuch	Schicht	Variante	Bereich 1	Mittelw. 1	Bereich 2	Mittelw. 2	Intensität	Schneide nach Bearbeitung
V1	nACRo	CBN-3	5000-8000	10442	18000-21000	10600	10521	kleiner Schneidenausbruch
V2	nACo	CBN-4	5000-8000	9382	12000-15000	9472	9427	leichte Verschleißspuren
V3	nACo	CBN-5	5000-8000	10278	12000-15000	10364	10321	leichte Verschleißspuren
V4	nACRo	CBN-1	5000-8000	10479	12000-15000	10700	10589	kleiner Schneidenausbruch
V5	nACRo	CBN-2	5000-8000	10468	12000-15000	10767	10617	leichte Verschleißspuren
V6	blank	-	5000-8000	10090	12000-15000	10172	10131	leichte Verschleißspuren
V7	blank	-	5000-8000	10123	12000-15000	10247	10185	Schneidenausbruch
V8	nACRo	CBN-3	5000-8000	10428	12000-15000	10353	10390	in Ordnung
V9	nACo	CBN-4	5000-8000	9525	15000-18000	9382	9454	in Ordnung
V10	nACo	CBN-5	5000-8000	10437	12000-15000	10620	10528	in Ordnung
V11	nACRo	CBN-1	5000-8000	10603	12000-15000	10780	10692	kleiner Schneidenausbruch
V12	nACRo	CBN-2	5000-8000	10408	12000-15000	10385	10396	leichte Verschleißspuren
V13	nACRo	CBN-3	5000-8000	10434	12000-15000	10489	10461	in Ordnung
V14.1	nACRo	CBN-1	5000-8000	10562	12000-15000	10921	10742	
V14.2	nACRo	CBN-1	5000-8000	10413	12000-15000	10539	10746	in Ordnung
V15.1	nACRo	CBN-2	5000-8000	9882	12000-15000	10228	10055	
V15.2	nACRo	CBN-2	500-3000	10427	10000-12500	10717	10572	leichte Verschleißspuren

Bild 5: Messergebnisse zum Drehprozess

Hier sind die Schichten nACo (Ti-haltige Nanocomposite-Schicht) und nACRo (Cr-haltige Nanocomposite Schicht) den jeweiligen Versuchen zugeordnet. Derzeit an der GFE ablaufende Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Optimierung der Schichtstruktur, hier wurden verschiedene Varianten (CBN-1 bis CBN-5 für verschiedene Schichten für CBN-Werkzeuge) entwickelt und werden noch getestet. In der Tabelle ist weiterhin angegeben, ob Schneiden nach der Bearbeitung Verschleißspuren oder evtl. auch Schneidenausbrüche aufweisen. Die Ermittlung des Schneidenzustands erfolgte dabei normaloptisch. Teilweise sind geringe Verschleißspuren erkennbar, ein Teil der Schneiden ist in Ordnung. An einzelnen Schneiden konnten auch Schneidenausbrüche beobachtet werden. Anhand der Mittelwerte 1 und 2 kann eine Aussage über die aufgetretene Spantemperatur für die jeweilige Schneide gemacht werden. Die geringeren Temperaturintensitäten beim Drehen werden bei Werkzeugen mit der nACo Beschichtung beobachtet. Für die Versuche 14 und 15 wurde jeweils eine Wiederholungsmessung durchgeführt. Hierbei ergaben sich nur Unterschiede (vor allem im Versuch 15), die durch die Messanordnung und durch Verschleißerscheinungen verursacht werden können. Die in der letzten Spalte angegebene Tendenz zeigt, ob sich die Spantemperatur während der Bearbeitung erwärmt (positive Tendenz) oder abgekühlt (negative Tendenz) hat.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den Untersuchungen zum Fräsprozess präsentiert. Im Bild 6 ist die Wärmeverteilung unmittelbar nach dem Materialabtrag (linkes Bild) und zur Bestimmung der Spantemperatur (rechtes Bild) dargestellt.

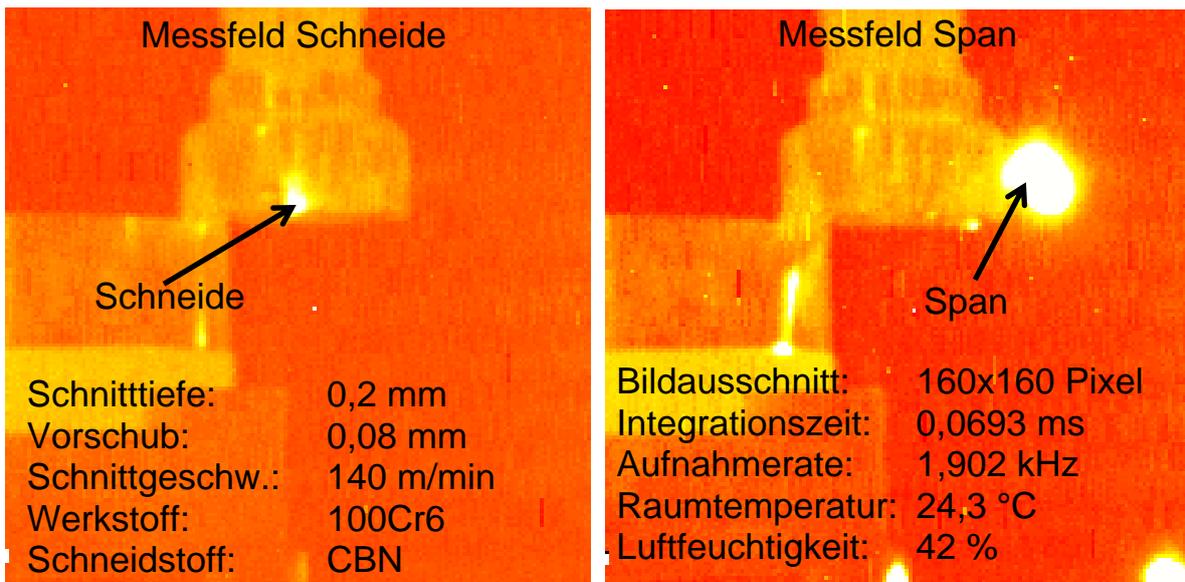


Bild 6: Ermittlung der Schneiden- und Spantemperatur beim Fräsen

Für die Schneide als auch für den Span wurde jeweils das maximale Messsignal aufgenommen. Da bei dieser Auswertung das Messfeld für die Schneide und Span nicht ortsfest ist, musste die Anpassung des Messfeldes manuell erfolgen. Um den Aufwand zu reduzieren wurden pro Messung 5 Werte bestimmt, aus dem dann ein Mittelwert bestimmt wurde. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der Tabelle im Bild 7 aufgelistet.

Versuch	Schicht	Variante	Intensität		Schneide nach Bearbeitung
			Schneide	Span	
V2	nACRo	CBN-2	7 289	14 531	in Ordnung
V3	nACo	CBN-3	7 134	13 707	kaum Verschleißspuren
V4	nACo	CBN-2	7 193	15 802	leichte Verschleißspuren
V5	nACo	CBN-3	7 133	10 641	leichte Verschleißspuren
V6	nACo	CBN-4	7 192	13 686	in Ordnung
V7	nACo	CBN-5	7 195	10 489	in Ordnung
V8	blank	-	7 152	13 283	in Ordnung
V9.1	nACRo	CBN-1	7 218	15 791	kleiner Schneidenausbruch
V9.2	nACRo	CBN-1	7 209	14 080	
V10.1	nACRo	CBN-3	7 146	11 348	leichte Verschleißspuren
V10.2	nACRo	CBN-3	7 164	12 662	
V11.1	nACo	CBN-4	7 185	15 841	in Ordnung
V11.2	nACo	CBN-4	7 123	11 859	

Bild 7: Messergebnisse zum Fräsprozess

Bei allen Versuchen ist die Schneidentemperatur ähnlich, die Spantemperatur variiert jedoch über einen größeren Bereich. Zur besseren Übersicht sind die Ergebnisse in der folgenden Grafik (Bild 8) dargestellt.

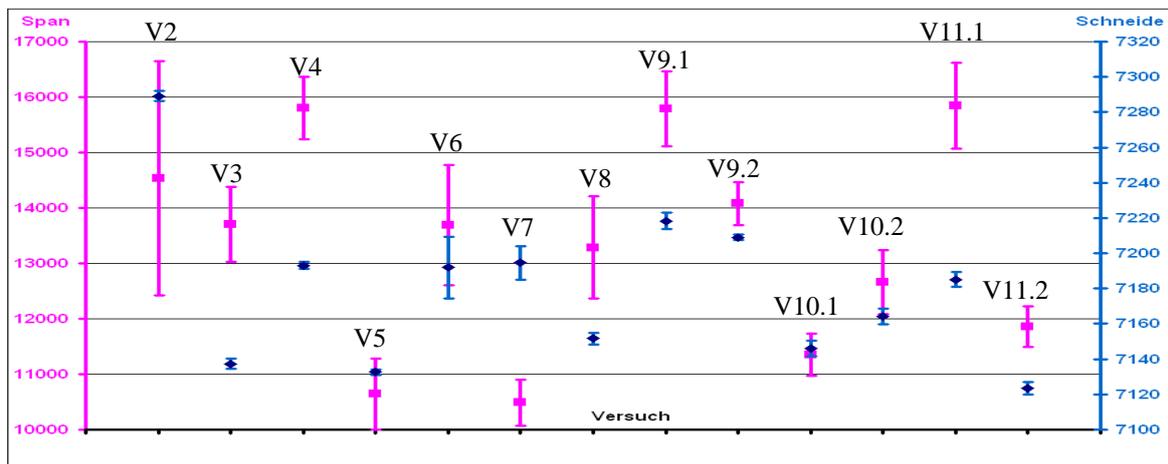


Bild 8: Wärmestrahlung der Späne und Schneiden beim Fräsen

Hier ist für jeden Versuch die ermittelte Schneiden- und Spanwärmestrahlung, wie bei den vorherigen Untersuchungen in Digits, aufgetragen. Zusätzlich wurde der Fehler abgeschätzt. Die Messungen zum Fräsen erfolgten analog zu den Drehversuchen mit verschiedenen Schichtsystemen und -strukturen. In den Versuchen 9, 10 und 11 wurden jeweils zwei Versuche durchgeführt. Die gemessene Temperaturintensität der Schneide ist dabei unabhängig von der Beschichtung und der Anzahl der durchgeführten Versuche. Nach den zweiten Messungen zu den Versuchen 9 und 10 zeigte sich, dass die beschichteten Schneiden schon leichte Bearbeitungsspuren und geringe Ausbrüche der Beschichtung an der Schneide aufwiesen. Im Versuch 11 wurde ein anderes Schichtsystem (nACo) eingesetzt. Die hier eingesetzte Schneide zeigt normaloptisch noch keine Gebrauchsspuren. Die gemessene starke Reduzierung der Temperatur beim zweiten Schnitt im Versuch 11 korreliert möglicherweise mit der weniger geschädigten Schneidenoberfläche und dem verwendeten Schichtsystem. Es sind allerdings weitere Untersuchungen geplant, um dieses Ergebnis zu verifizieren.

Bei der Analyse der Spantemperatur wurde festgestellt, dass die Späne, je nach Versuch, unterschiedliche Flugverhalten zeigten. Um diese Flugbahnen analysieren zu können, wurden die Einzelaufnahmen einer Messreihe übereinander gelegt, was mit einer

Langzeitbelichtung in der Fotografie zu vergleichen ist. Die so ermittelten Flugbahnen sind im Bild 9 für die durchgeführten Versuche dargestellt und stellen ein weiteres Hilfsmittel zur Bewertung der Schneiden dar.

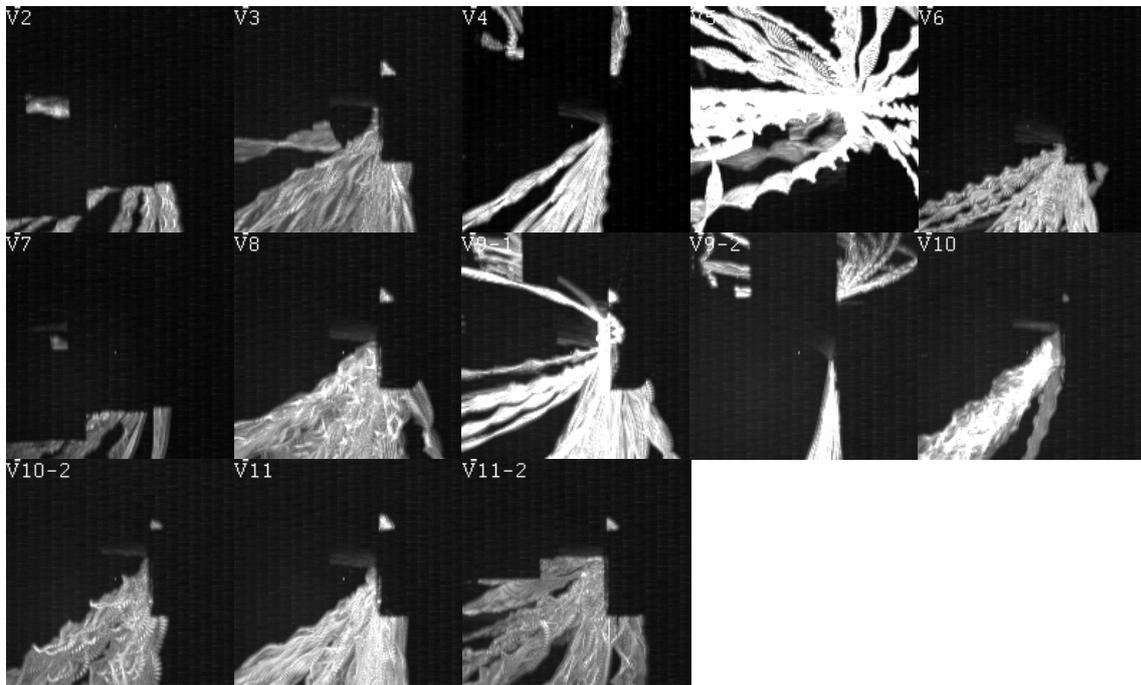


Bild 9: Flugbahnen der Späne

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine Hochgeschwindigkeitsthermografiekamera zur Analyse der spanenden Bearbeitung eingesetzt. Hierbei wurde der Dreh- und Fräsprozess analysiert, wobei unterschiedliche Schneidwerkzeuge eingesetzt wurden. Im Fall des Drehprozesses konnte auf Grund der Zugänglichkeit nur die Spantemperatur analysiert werden. Hier wurden jedoch signifikante Änderungen in Abhängigkeit von der Schneide festgestellt. Im Fall des Fräsprozesses konnten sowohl die Schneide als auch die Späne analysiert werden. Des Weiteren konnten auch die Flugbahnen der Späne dokumentiert werden. Somit ist eine umfangreiche Analyse des Spanprozesses mit Hilfe einer Thermokamera gewährleistet.

Weiterführende Arbeiten wären die Ermittlung der Absoluttemperaturen mit Hilfe einer Kalibrierung. Weiteres Optimierungspotential liegt bei der Positionierung der Kamera zur Schneide, um eine höhere Ortsauflösung zu erreichen. Hierbei muss jedoch auch der Schutz der Kamera gewährleistet sein.