

# SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN

Fachzeitschrift für Schweißen und verwandte Verfahren

## Autorenrichtlinie



Stand: 03/2024

## Das Wichtigste auf einen Blick:

- Text der Manuskripte als Word-Datei einreichen. Bitte verzichten Sie auf manuelle Silbentrennung. Ihr Word-Dokument wird zur Begutachtung und Redigat verwendet, anschließend wird der Beitrag von uns gesetzt.
- Bilder (Fotos, Zeichnungen, Schemadarstellungen, Diagramme) und Tabellen (Zahlentafeln, tabellarische Gegenüberstellungen) unterscheiden. Auflösung von Bilddateien mindestens 300 dpi, Dateiformate: tiff, eps, ai, jpeg, png. Bilder als separate Dateien zusenden; Tabellen separat als Word oder Excel.
- Maßeinheiten müssen zwingend Si-konform sein. Veraltete Maßeinheiten wie At.-%, Gew.-% usw. bitte nicht verwenden!
- Bitte beachten Sie auch, dass unser Zeitschriften-Design keine Platzierung von Trademark- und Copyright-Symbolen sowie keine Schreibweise in Versalien von Firmen- und Produktnamen vorsieht.
- Bitte verwenden Sie beim Zitieren den numerischen Stil: für verwendete Quellen im Fließtext Nummer in der fortlaufenden Reihenfolge vergeben. Bitte möglichst nicht die automatische Referenzerstellung von Word benutzen!

## 1 Inhaltliche und formale Textgestaltung

Dieses Dokument soll Ihnen zum einen als Anleitung zur Gestaltung Ihres Textes, zum anderen als Formatvorlage für Ihren Artikel dienen. Für diesen Zweck sind die üblichen Formatvorlagen von Word – Standard, Titel, Überschrift, Beschriftung – so angepasst, dass Sie in diesem Dokument mit dem Schreiben Ihres Artikels sofort loslegen können.

### 1.1 Dateien

Bitte reichen Sie folgende Dateien ein:

- Eine Text-Datei in Word mit am Ende des Dokuments eingebetteten Bildern und Tabellen für die redaktionelle Bearbeitung und das Peer-Review Verfahren.
- Beitragsbilder (inklusive Fotos von Autoren) als separate Dateien (tiff, jpeg, png, eps, ai) mit einer Auflösung von 300 dpi.
- (siehe auch die Hinweise im Abschnitt 2. Bilder und Tabellen).

### 1.2 Gliederung des Beitrages

Ihr Beitrag umfasst ca. 27.000 Zeichen inkl. Leerzeichen und besteht aus Vorspann, Hauptteil und Referenzen.

#### 1.2.1 Vorspann

Der Vorspann enthält folgende Elemente in angegebener Reihenfolge:

- Beitragstitel: max. 100 Zeichen inkl. Leerzeichen,
- Namen der Autoren (ohne erworbene Titel),
- Deutsche Kurzfassung: max. 1.500 Zeichen inkl. Leerzeichen; keine Absätze,
- englischsprachiger Titel,
- englischsprachige Kurzfassung.

#### 1.2.2 Hauptteil

Der Hauptteil ist maximal in die dritte Ebene strukturiert. Die Einleitung benötigt wie in dieser Vorlage ausgeführt – keine Überschrift

- Abschnittüberschriften haben max. 40 Zeichen
- Am Ende des Hauptteils steht ein Fazit über eventuelle weiter geplante Untersuchungen, Ausblick auf noch offene Probleme oder Ähnliches. Bei Forschungsarbeiten: Folgerungen für die Praxis.

#### 1.2.3 Literatur

Im Text verweisen Sie über die in eckige Klammern gesetzte Nummer auf den Eintrag im Literaturverzeichnis zum Beispiel:

- [1] Matting, A., u. G. Jacoby: Die Zerrüttung metallischer Werkstoffe bei Schwingbeanspruchung in der Fraktografie. Aluminium 38 (1962), H. 10, S. 654/61.
- [2] Neumann, A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Bd. 1, S. 31/40. DVS Media, Düsseldorf 1990.

Bei allen Quellen (auch Online-Quellen) bitte nach DIN ISO 690 zitieren. Bitte verwenden Sie beim Zitieren den numerischen Stil: für verwendete Quellen im Fließtext Nummer in der fortlaufenden Reihenfolge vergeben. Bitte möglichst nicht die automatische Referenzerstellung von Word benutzen.

### 1.3 Formale Textgestaltung

Die maximale Länge des formatierten Beitrages beträgt 27.000 Zeichen (inkl. Leerzeichen)

- Die SCHWEISSEN und SCHNEIDEN verwendet die vom Duden favorisierten Schreibungen und Regeln.
- Tabulatoren werden lediglich für Listen und Aufzählungen benötigt. Tabellen sollen in Word nicht mit Tabulatoren, sondern mit dem Tabelleneditor erfasst werden. Die Gleichungen sind mit fortlaufenden arabischen Ziffern zu nummerieren (in runden Klammern). Bitte exportieren Sie jede einzelne Formel als Bild in eine eigene pdf-Datei.

## 2 Bilder und Tabellen

Bilder sind wichtige ergänzende Elemente zu wissenschaftlichen Texten. Wir bitten Sie, folgende Hinweise zu beachten:

- Insgesamt 7 Bilder und Tabellen.
- Zeichnungen, Diagramme und Fotos werden in der Bildunterschrift als Bild (nicht „Abb.“ oder „Fig.“) gekennzeichnet.
- Bilder und Tabellen werden fortlaufend nummeriert (z. B. Bild 1, Bild 2 usw.) und mindestens einmal im Text zitiert.
- Die Bildunterschrift darf nicht in der Grafik stehen. Sie sollte den Inhalt des Bildes so wiedergeben, dass dieses selbsterklärend ist.
- Bilder fortlaufend nummerieren, Bildnummern im Manuskripttext einfügen.
- Tabellen (unabhängig von den Bildern) fortlaufend nummerieren, Tabellennummern im Manuskripttext einfügen.
- Benennungen, Bezeichnungen usw. nach den neuesten DIN-Normen, DVS-Merkblättern usw.
- Die Schriftart in allen Bildern sollte gleich sein.
- Effekte wie Füllmuster, Outline Fonts, Verläufe und Schatten bitte vermeiden.
- Bilder möglichst in Farbe; Mindestauflösung 300 dpi.
- Dateiformate: Wir arbeiten mit tiff, eps, ai, jpeg, png.

## 3 Autoren

- Titel, Vor- (ausgeschrieben) und Zuname aller Verfasser, aktuelle Berufs-/Tätigkeitsbezeichnungen mit Angabe von Institut, Arbeitgeber und (optional) E-Mail-Adressen und Porträtfotos.
- Kurzer Werdegang für unsere Datenbank.

## 4 Danksagung

Für die Manuskripte zu IGF-Vorhaben bitte eine Danksagung einfügen.

# Kontakt zur Redaktion

## Manuskripte bitte an:

redaktion@dvs-media.info  
victor.travkin@dvs-media.info

## Fachbeiträge zu IGF-Vorhaben:

Bitte senden Sie das Manuskript zusätzlich an [sylvia.musch@dvs-home.de](mailto:sylvia.musch@dvs-home.de), falls es sich um eine Veröffentlichung zu einem abgeschlossenen IGF-Vorhaben handelt, das über die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS beantragt wurde.

## Hinweis zur geschlechtergerechten Sprache

Die in der SCHWEISSEN und SCHNEIDEN veröffentlichten wissenschaftlichen Fachbeiträge werden im Peer-Review-Verfahren vorrangig hinsichtlich ihrer inhaltlichen Qualität geprüft. Das in den Artikeln zumeist gewählte generische Maskulinum bezieht sich dabei zugleich auf die männliche, die weibliche und andere Geschlechteridentitäten. Wir unterstützen ausdrücklich die Verwendung einer geschlechtergerechten Sprache, verzichten aber zu Gunsten der Leserlichkeit darauf.

**Autoren**

FACHBEITRAG | ADDITIVE FERTIGUNG VON HOCHBELASTETEN BAUTEILEN

Max Mustermann, Max Mustermann, Max Mustermann, Max Mustermann, Max Mustermann

**Beitragstitel**  
max. 100  
Zeichen inkl.  
Leerzeichen

# Herstellung beanspruchungsgerechter Oberflächen durch Kombination innovativer additiver und abtragender Fertigungsschritte an hochbelasteten Komponenten

**Kurzfassung**  
max. 1.500  
Zeichen inkl.  
Leerzeichen

Die additive Fertigung mittels Schweißverfahren bietet große ökonomische Vorteile für eine ressourceneffiziente Bauteilherstellung. Offene Fragen bezüglich Homogenität, Anisotropie der Schweißgefüge und den damit verbundenen Bauteileigenschaften stehen einer wirtschaftlichen Verarbeitung oftmals im Wege. Finale Bauteilgeometrie und Oberflächengüte erfordern meist komplementäre subtraktive Fertigungsschritte. Werkstoffe für hochbelastbare Komponenten sind oftmals schwer spanbar. In einem Vorhaben der BAM und des ISAF wurde untersucht, wie die Modifikation der AM-Schweißzusätze und das ultraschallunterstützte Fräsen (US) die Zerspanungssituation verbessern. Der vorliegende Artikel stellt wesentliche Zusammenhänge zwischen Legierung, Gefüge und Zerspanung zweier schwer spanbarer Hochleistungslegierungen (FeNi und CoCr) dar. Großes Potenzial zeigte neben dem US die Modifikation mit Zr und Hf bei Zulegierung in das Schweißgut mittels Beschichtung von Massivdrähten bzw. Herstellung von Füllröhren.

**Kapitelüberschrift**

**1 Einleitung**

Der globale Trend zur Energie- und Ressourceneffizienz bedingt zunehmendes Interesse an der Additiven Fertigung (Additive Manufacturing AM). AM hat vielfältige wirtschaftliche Vorteile bei der Reparatur, Modifikation oder Herstellung von Bauteilen und zeichnet sich zudem insbesondere durch eine sehr effiziente Materialausnutzung aus [1]. Allerdings sind diese AM-Bauteile in der Regel mechanisch nachzubearbeiten. So werden durch Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide (z. B. Fräsen) die endgültigen Konturen bzw. Oberflächen nulliert [2]. Es ist ein erheblicher Erkenntnisgewinn erforderlich, wie sich die heterogenen und anisotropen AM-bzw. Schweißgefüge auf die Zerspanung und die resultierenden Bauteileigenschaften auswirken. Hochleistungslegierungen auf Basis von Kobalt und Nickel stellen aufgrund ihrer niedrigen Wärmeleitfähigkeit verbunden mit hoher Festigkeit und Zähigkeit zusätzlich eine Herausforderung für die wirtschaftliche Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide dar. Zu den komplexen Wechselwirkungen zwischen Gefüge und AM-Prozess, insbesondere bei AM-Ver-

fahren im Bereich von Abschmelzleistungen von MSG-Verfahren, fehlen bislang wesentliche Erkenntnisse. Diese wären für eine sichere und wirtschaftliche Fertigung, insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), von zentraler Bedeutung. Im Folgenden werden zusammenfassend Forschungsergebnisse des Vorhabens vorgestellt, die gerade die gezielte Legierungsmodifikation anwendungsbereit, schwer spanbarer Hochleistungslegierungen und die dadurch bedingte Beeinflussung der Erstarungs- und Gefügemorphologie fokussieren. Dadurch soll ein optimal gleichmäßiges und homogenes Gefüge sowie für nachfolgende mechanische Bearbeitungsprozesse stabile Prozessbedingungen erreichbar sein. Die beiden im Projekt untersuchten schwer spanbaren Legierungen wurden anhand zweier unterschiedlicher Anwendungsbereiche ausgewählt, in denen AM-Fertigungsschritte interessant sind: Formosen (FeNi36, Werkstoff-

**STICHWÖRTER**

Additive Fertigung, Hafnium, hochlegierte Stähle, metallurgische Fragen, Spanen, Zerkleumen

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung in wt % und mechanische Eigenschaften (bei RT, lt. Datenblatt) der Versuchswerkstoffe [9, 10]

Legierung	Ni	Co	Cr	Mo	W	Fe	Mn	C	$R_{p0.2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	AI [%]
FeNi36	36					Rest			310	520	48
CoCr20Ni9Mo5W	9	Rest	26	5	2	3	0,8	0,06	496	951	42

**Tabelle**

Schlichtfräsvorversuchen anhand konventioneller (CM) und ultraschallunterstützter Fräsvorgänge (US) analysiert.

**2 Material und Methoden**

**2.1 Versuchswerkstoffe**  
Für die beiden untersuchten Werkstoffe, FeNi36 (1.3912) und CoCr20Ni9Mo5W (2.4681) – weiterführend als CoCr-Legierung bezeichnet – sind in **Tabelle 1** die chemischen Zusammensetzungen sowie die mechanischen Eigenschaften dargestellt. FeNi36 zeichnet sich durch einen sehr niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten unterhalb der Curie-Temperatur aus, dem sogenannten Inverseffekt [3, 4]. Einsatzgebiete sind beispielsweise Flüssigkeits- und Formwerkzeuge für Verbundwerkstoffe [5, 6]. Die CoCr-Legierung wird aufgrund ihrer hervorragenden Korrosions- und Verschleißbeständigkeit bei Temperaturen bis zu

800 °C [7, 8] im Turbinen- und Anlagenbau eingesetzt.  
Zur Modifikation der beiden Legierungen liefen sich entsprechend im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung die Elemente Ti, Zr und Hf jeweils pulvermetallurgisch hinzulegieren. **Tabelle 2** Die Pulvermodifikation erfolgte mittels eines 3D-Schmelzmischers (Turbula, Fa. Willy A. Bachofen) mit dem infolge der rotatorischen, translationalen Bewegung und Inversion ein homogenes Mischgut erreicht wird. Anschließend wurden die Pulvermodifikationen mittels PTA-Verfahren schweißtechnisch zu AM-Proben (Ingot) verarbeitet. An den Ingoten erfolgten Analysen hinsichtlich ihrer Mikrostruktur und Härte sowie Zerspanbarkeit (Zerspankraft und Oberflächenrauhigkeit). Auf Basis dieser Kriterien wurden die drei vielversprechendsten Modifikationen identifiziert. **Tabelle 2** und mithilfe von modifizierten Füllröh-

ten (CoCr) bzw. mittels PVD-Beschichteter (PVD: Physical Vapor Deposition, dt. physikalische Gasphasenabscheidung) Massivdrähte (FeNi36) auf den MSG-Prozess übertragen. Die PVD-Beschichtungskammer (Fa. Ceme-Con) wurde dabei chargenweise mit der Substratabschleifkammer bestückt. Die Beschichtungsdauer von 1 h resultierte in einer Beschichtungsdicke von 1,188 µm und entspricht ca. 0,4 wt% bezogen auf den Drahtquerschnitt. Für die Modifikationen wt% = 1 % bzw. wt% = 1 % der CoCr-Legierung wurden spezielle Füllröhren hergestellt.

**2.2 MSG-Schweißungen**

Die MSG-Schweißversuche wurden vollautomatisch mittels einer MSG-Schweißanlage (Fa. EMW) und einem Schweißroboter (Fa. HLT-Gulliver) durchgeführt. Die Schweißparameter für die jeweiligen Legierungsmodifikationen sind in **Tabelle 3**. Mehrere Schweißraupen wurden in

**Unterkapitelüberschrift**

**ABSTRACT**

## Production of Stress-resistant Surfaces by Combining Innovative Additive and Removal Manufacturing Processes on Highly Stressed Components

Additive manufacturing using welding processes offers great economic advantages for resource-efficient component production. Open questions regarding homogeneity, anisotropy of the weld structure and the associated component properties often limit economical processing. Final component geometry and surface quality usually require complementary subtractive manufacturing steps. Materi-

als for highly stressed components are often difficult to cut. A BAM and ISAF project investigated how the modification of AM welding filler metals and ultrasonic-assisted milling (US) improve the machining situation. This article presents the essential relationships between alloy, microstructure and machining of two superalloys (FeNi and CoCr) that are difficult to cut. In addition to US, modification with Zr

and Hf showed great potential when alloyed into the weld metal by coating solid wires or producing core wires.

**KEYWORDS**

additive manufacturing, hafnium, high alloy steels, metallurgical questions, machining, zirconium

**Englischsprachiger Titel**

**Englischsprachige Kurzfassung**

FACHBEITRAG HERSTELLUNG BEANSPRUCHUNGSGERECHTER OBERFLÄCHEN

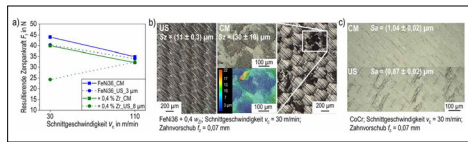


Bild 3. Resultierende Zerspankräfte Fz, der FeNi36-Legierung (a). Vergleich der Oberflächen CM vs. US (Lichtmikroskopie) der FeNi36-Legierung (b) (1) und der CoCr-Legierung (c).

2.2 Zerspanbarkeit

Bild 3a zeigt die mittleren resultierenden Zerspankräfte Fz in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit vs und Ultraschallunterstützung beim Fräsen (Pa = 100 %; US bzw. Pa = 0 %; CM) für die FeNi36-Modifikationen in Form eines Effektivitätsdiagrammes. Die Modifikation mit us = 0,4 % bedingt eine signifikante Reduzierung der resultierenden Zerspankraft im Vergleich zur FeNi36-Ausgangsliegierung. Dieser Effekt wird auf die feinspeisere und homogenere Ausscheidungen an den Korngrenzen des modifizierten Werkstoffes zurückgeführt, welche zu einer Homogenisierung der Mikrostruktur in Verbindung mit einem stabileren bzw. steigerten Zerspanprozess führen. Analog dazu bedingt die Homogenisierung der Mikrostruktur der CoCr-Legierung durch das Hinzulagieren von us = 1 % bzw. us = 1 % ebenfalls eine signifikante Reduzierung der Zerspankraft verglichen mit der CoCr-Ausgangsliegierung. Ähnliche Ergebnisse zeigten Präzessions- an PTA-Schweißungen derselben Modifikationen [13]. Für die CoCr-Legierung bedingt die Ultraschallunterstützung unabhängig von der Modifikation keinen Einfluss auf die resultierende Zerspankraft. Für die FeNi36-Legierung hingegen bewirkt die Ultraschallunterstützung unabhängig von der Modifikation eine signifikante Reduzierung der resultierenden

Effekt wird insbesondere bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten beobachtet. Bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit verringert sich die Anzahl der Schwingschallunterstützung beim Fräsen (Pa = 100 %; US bzw. Pa = 0 %; CM) für die FeNi36-Modifikationen in Form eines Effektivitätsdiagrammes. Die Modifikation mit us = 0,4 % bedingt eine signifikante Reduzierung der resultierenden Zerspankraft und führt bei einer Schnittgeschwindigkeit von 30 m/min zu einer Wechselwirkung mit der Ultraschallunterstützung. Dies ist auf den erhöhten Einfluss der Ultraschallunterstützung auf die Zerspankraft bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten zurückzuführen. Bild 3b zeigt die geschichteten Oberflächen der Modifikation von FeNi36 mit us = 0,4 %. Die Ultraschallunterstützung bedingt unabhängig von der Modifikation für beide Werkstoffe eine signifikante Reduzierung der Rauheit bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten im Vergleich zum CM. Ausschlaggebend dafür ist die Vermeidung der Bildung einer Aufbauschmelze [17] durch die axiale Oszillation des Werkzeuges, welche eine Adhäsion des Werkstoffes an die Werkzeugspitze unterbindet. Die dadurch deutlich geringeren Defektdichten bzw. größten (Bild 3b) bedingen eine wesentlich gleichmäßigere Oberfläche. Die Erhöhung der US-Amplitude von 3 µm auf 8 µm steigert diesen Effekt weiter und führt zu einer deutlich geringeren Rauheit.

Bild 3c zeigt die geschichteten Oberflächen der CoCr-C-Ausgangsliegierung für

CM und US. Analog zu den Ergebnissen der FeNi36-Legierung bedingt die Ultraschallunterstützung werkstoffunabhängig bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten eine signifikante Reduzierung der Rauheit. Dieser Effekt wird auf die reduzierte Anzahl an Rillen aufgrund der axialen Oszillation des Werkzeuges zurückgeführt [15], welche in Bild 3c deutlich zu erkennen ist. Die geringste Rauheit wird für beide Legierungssysteme werkstoffunabhängig bei einer Schnittgeschwindigkeit von 20 m/min mit Ultraschallunterstützung (FeNi36: As = 9 µm; CoCr-C: As = 3 µm) erzielt. Darüber hinaus wurde in [18] für die FeNi36-Ausgangsliegierung gezeigt, dass der US im Gegensatz zum CM deutlich geringere oberflächennahe Eigenspannungen bis hin zu Druckeigenspannungen induziert, welche im Einklang mit den Ergebnissen der Zerspankraft sowie der Rauheit für niedrige Schnittgeschwindigkeiten minimal sind. Die oberflächennahen Druckeigenspannungen können unter anderem einen positiven Effekt auf die Bauteillebensdauer haben [19].

4 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die Mikrostruktur sowie die Zerspanbarkeit der FeNi36- und der CoCr-Legierungen durch eine Modifikation mit keinem Zugaben von Zr bzw. Hf positiv beeinflusst werden können. Durch die Legierungsmodifikation und die damit einhergehende Homogenisierung der Mikrostruktur wird die Zerspankraft verringert. Dies führt zu einer längeren Werkzeugstandzeit und einem geringeren Ressourcen-

verbrauch bei der Zerspanung mit entsprechenden wirtschaftlichen Vorteilen für KMU. Das US bedingt sowohl für FeNi36 als auch für die CoCr-Legierung werkstoffunabhängig die geringste Rauheit bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. Ferner induziert der US oberflächennahe Druckeigenspannungen, welche einen positiven Einfluss auf die Bauteillebensdauer haben können. Durch den Einsatz des US kann im Prozessketten, in denen großflächig oberflächennahe Druckeigenspannungen induziert werden, der letzte Fertigungsprozess, zum Beispiel das Kugelhobeln, eingespart und ein erheblicher Kostenvorteil für den Anwender erzielt werden. Ausgehend von diesen Analysen sind insbesondere für KMU Handlungsempfehlungen für eine sichere und wirtschaftliche komplexe additive und zerspanende Fertigung solcher schwer bearbeitbaren Hochleistungslegierungen ableitbar.

Literatur

[1] Tsai, K. C., u. H. Wang: The current state of research of wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). A Review. Applied Sciences 10 (2021), H. 11, 6017. https://doi.org/10.3390/app10216017

Autoren

Erka Mustermann, M.Sc. Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Schweißtechnik erka.mustermann@dsn.de

Dr.-Ing. Max Mustermann

Lehrstuhlinhaber am Institut für Schweißtechnik max.mustermann@dsn.de

Schweißen und Schneiden 76 (2024) Heft 1-2

[2] Berner, H. u. W. Thiesen: Eisenwerkstoffe - Stahl und Gussstähle. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer XX/XXX/DVS-Nummer VV17V der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Fachmeer Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Schweißen und Schneiden 76 (2024) Heft 1-2

Bild min. 300 dpi

Bildunterschrift

INFO

Der Inhaltsbereich des zugrunde liegenden Forschungsprojekts ist bei der DVS Media GmbH erhältlich. Artikel-Nr.: 170661. https://bit.ly/DVS\_Abschlussberichte

52

Infokasten (optional)

Fazit am Ende des Beitrags

Passbild

Autorenangaben

Literatur

Danksagung (optional)