



Bestimmung des Dendritenarm- abstandes für Gussstücke aus Aluminium-Gusslegierungen

INHALT 1 Geltungsbereich **S.1** | 1.1 Allgemeines **S.1** | 1.2 Legierungen **S.1** | 1.3 Gießverfahren **S.1**
2 Erläuterungen **S.2** | 3 Messung des Dendritenarmabstandes (DAS oder λ_2) **S.4**
Anhang: Weiterführende Hinweise/ Erläuterungen zur statistischen Datenanalyse und -auswertung
bei der Messung des Dendritenarmabstandes **S.7**

1 Geltungsbereich

1.1 Allgemeines

Diese BDG-Richtlinie gilt für Gussstücke aus Aluminium-Gusslegierungen. Ziel dieser Richtlinie ist die Beschreibung der Prüfmethodik zur Ermittlung des Dendritenarmabstandes (DAS oder λ_2) und die Abgrenzung zu weiteren Gefügekenngößen.

Der Geltungsbereich dieser Richtlinie ist auf die Prüfmethodik zur Messung des Dendritenarmabstandes beschränkt. Weitere Prüfmethode, z. B. die Bestimmung des primären Dendritenabstandes (λ_1) sind nicht Bestandteil der Richtlinie.

1.2 Legierungen

Der Geltungsbereich dieser Richtlinie beschränkt sich auf Gussstücke aus Aluminiumgusslegierungen nach der DIN EN 1706.

1.3 Gießverfahren

Der Inhalt dieser BDG-Richtlinie bezieht sich auf

- > Sandgießverfahren und Varianten,
- > Kokillengießverfahren und Varianten (z. B. Niederdruckkokillenguss),
- > Druckgießverfahren einschließlich artverwandter Sondergießverfahren (z. B. Squeeze-Casting) und
- > Feingießverfahren.

Vom Fachausschuss „Leichtmetallguss“ im BDG erstellte Richtlinie

2 Erläuterungen

Der weitaus größte Teil der Aluminium-Gusslegierungen erstarrt dendritisch, d. h. es werden primäre α -Dendriten ausgebildet. Die Anzahl an ausgeschiedenen Dendriten wird maßgeblich von der Anzahl der in der Schmelze und an der Formwand vorhandenen Kristallisatoren bestimmt. Abgesehen von einer eng begrenzten Randzone ist die Wachstumsrichtung der verschiedenen Dendriten (= Körner) regellos orientiert. Der **Abstand primärer Dendriten** (λ_1), auch als Dendritenstammabstand bezeichnet, lässt sich daher an Gussstücken, die in den in Kap 1.3 genannten Verfahren hergestellt worden sind, nicht statistisch abgesichert zuverlässig ermitteln.

(Anmerkung: Ausgenommen davon sind Gussstücke, die im Verfahren der gerichteten Erstarrung hergestellt werden. Das Verfahren der gerichteten Erstarrung wird in Laboruntersuchungen, die wissenschaftlichen Zwecken dienen, eingesetzt. In der industriellen Praxis für den Aluminiumguss findet es praktisch keine Anwendung.)

Bild 1 skizziert die Abstände der primären Dendriten λ_1 und der Dendritenarme DAS (auch λ_2 oder SDAS).

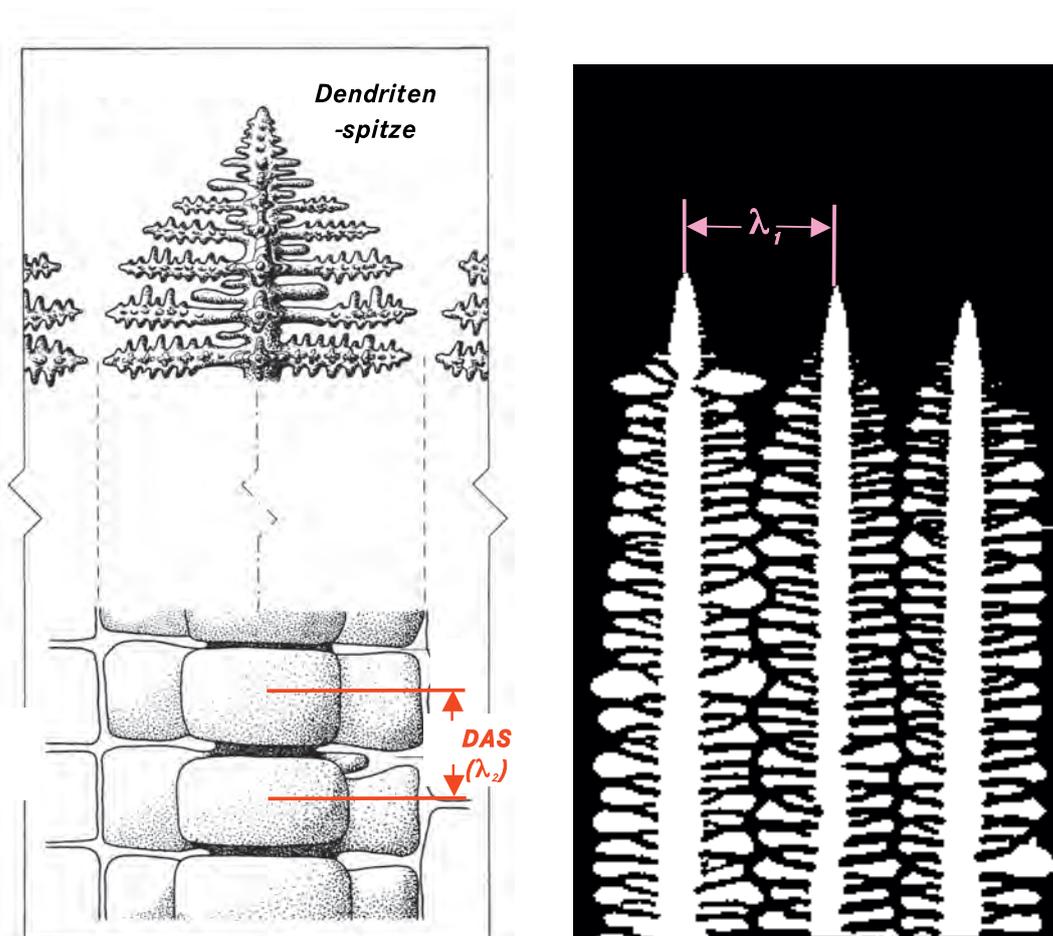


Bild 1: Schematischer Aufbau eines Dendriten während des Wachstums mit der Dendritenspitze und den Dendritenarmen, wie sie sich mit dem Beginn der Erstarrung ausbilden und wie sie nach dem Ende der Erstarrung vorliegen.



In der weiteren Erstarrungsabfolge verzweigen sich die Spitzen der primären Dendriten und bilden sekundäre Dendriten aus, allgemein als **Dendritenarme** bezeichnet.

Der Abstand zwischen zwei benachbarten Dendritenarmen wird als **Dendritenarmabstand DAS** (**dendrite arm spacing**) oder λ_2 bezeichnet. In verschiedenen (vor allem in US-amerikanischen) Publikationen wird auch die Abkürzung SDAS (sekundärer Dendritenarmabstand) verwendet. Der SDAS entspricht dem beschriebenen DAS.

Die Abstände der Dendritenarme werden gesteuert von der Höhe der lokalen Erstarrungszeit. Der DAS (oder λ_2) und die lokale Erstarrungszeit t_f sind über eine werkstoffabhängige Konstante **k** (siehe **Tabelle 1**) über Gleichung (1) wie folgt miteinander verknüpft:

$$\lambda_2 = k * \sqrt[3]{t_f} \quad (1)$$

Metallphysikalisch ist der Zusammenhang dadurch begründet, dass bei einer langen lokalen Erstarrungszeit (gleichbedeutend mit einer niedrigen Erstarrungsgeschwindigkeit) einzelne Arme wieder aufschmelzen und die Abstände sich vergrößern (Reifungsprozess). Ein Verzweigen kommt zum Stillstand, wenn die Diffusionsfelder der Spitzen konkurrierender Dendriten sich überlagern.

Legierung	k	Erstarrungsintervall
	$[\mu\text{m s}^{-1/3}]$	
AlMg3	11,1	50
AlMg5	10,5	80
AlSi5Mg	11,5	70
AlSi7Mg	11,0	55
AlSi10Mg	10,4	45
AlCu4Ti	12,4	90
Al99,8	20,4	
Al99,5	18,5	

Tabelle 1: Werte für die Legierungskonstante **k** (auch als A_0 bezeichnet)

Für die lokale Erstarrungszeit t_f und Erstarrungsgeschwindigkeit \dot{T} gilt folgender Zusammenhang (Gleichung(2)):

$$\dot{T} = \frac{T_{s-l}}{t_f} \quad (2)$$

T_{s-l} ist das Erstarrungsintervall der Legierung.

Bei bekanntem Erstarrungsintervall T_{s-l} der verwendeten Gusslegierung, der aus **Tabelle 1** zu entnehmenden Legierungskonstanten **k** und mit dem aus dem Schliff ermittelten Dendritenarmabstand λ_2 lässt sich die lokale Erstarrungsgeschwindigkeit \dot{T} aus den Gleichungen (1) und (2) berechnen.



Aus den Gleichungen (1) und (2) ist ferner abzuleiten, dass Änderungen in der lokalen Erstarrungsgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf den Dendritenarmabstand λ_2 haben, da der Dendritenarmabstand lediglich proportional zur dritten Wurzel aus der Erstarrungszeit ist.

Bei hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten ist es möglich, dass die sekundär wachsenden Dendriten (= Dendritenarme) sich weiter verzweigen können und tertiäre Dendriten ausbilden. Dieses Verzweigen erfolgt vor allem dann, wenn die tertiären Dendriten günstiger zur Wärmeentzugsrichtung orientiert sind als die sekundären Dendriten.

Bei der Erstarrung eines Gussteils steuert die Abkühlgeschwindigkeit die Feinheit des Gussgefüges und damit zu einem gewissen Grad die mechanischen Eigenschaften. Aus der Größe des Dendritenarmabstandes können damit in begrenztem Maß Rückschlüsse auf die Festigkeitseigenschaften eines Gusstücks gezogen werden. Der Dendritenarmabstand selbst ist dabei allerdings nicht die bestimmende Größe, sondern die über die Abkühlrate beeinflusste Mischkristall- und Ausscheidungshärtung und die Schwindungs- und Gasporosität.

3 Messung des Dendritenarmabstandes (DAS oder λ_2)

Die Messung des DAS kann direkt am metallografisch präparierten Schliff im Lichtmikroskop mit der quantitativen Gefügeanalyse durchgeführt werden. Alternativ sind auch Messungen am Gefügebild möglich. Die Messung soll in einer Zone erfolgen, die mindestens 0,5 mm von der Gussoberfläche entfernt liegt und einen Querschnitt über die Wanddicke des Gusstücks abbildet.

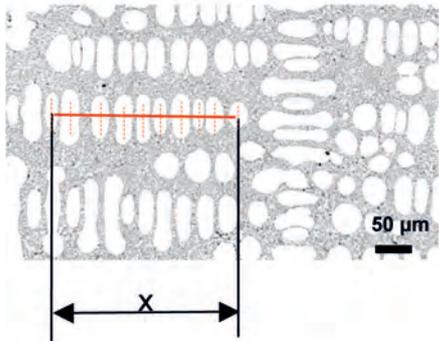
Da ein Schliff oder Gefügebild nur einen zweidimensionalen Schnitt durch das komplexe räumliche Netzwerk der Dendriten abbildet, sind geeignete in der Schliffebene liegende Dendritenarme vom Bearbeiter manuell auszuwählen.

Zur Messung des Dendritenarmabstandes DAS sind

- > solche Dendriten auszuwerten, die mindestens 5 nebeneinander liegende Dendritenarme aufweisen (nach Vereinbarung in Ausnahmefällen auch weniger) und
- > mindestens 10 verschiedene Dendriten (mit entsprechend unterscheidbaren Armen) heranzuziehen.

Der auszuweisende DAS wird als Gesamtmittelwert aus den DAS-Einzelwerten errechnet.

Im Anhang werden weiterführende Erläuterungen und Hinweise zur statistischen Analyse und Auswertung der Messdaten gegeben. Sie sind optional zwischen Gussstücklieferant und -abnehmer zu vereinbaren.



In **Bild 2** ist skizziert, wie der DAS bestimmt wird. Bei der Abstandsbestimmung ist der Vergrößerungsfaktor zu berücksichtigen.

x = Länge des ausgewerteten Dendritenstamms

m = Anzahl an Dendritenarmen

$$\text{DAS} = x/m - 1$$

Im vorliegenden Beispiel sind:

$x = 270 \mu\text{m}$

$m = 10$

DAS = $30 \mu\text{m}$

Für eine weitgehend fehlerfreie Messung ist ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen bei der auswertenden Person vorauszusetzen. Eine Fehlerquelle kann darin liegen, dass in Einzelmessungen Dendritenarme ausgewertet werden, die zu unterschiedlichen Dendritenstämmen gehören. **Bild 3** zeigt eine Schlifflage, in der von einem Kristallisationskeim Dendritenstämmen in 4 Richtungen gewachsen sind, die unterschiedlich deutlich ausgeprägte Dendritenarme gebildet haben, deren Abstände (DAS oder λ_2) nach dem oben skizzierten Vorgehen messtechnisch bestimmt werden können. Das Bild macht deutlich, dass eine Messung der primären Dendritenabstände (λ_1) aufgrund der sich beliebig einstellenden Wachstumsrichtung nicht möglich ist.

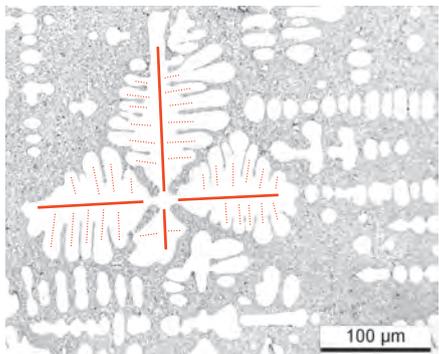


Bild 3: Primär erstarrtes α -Aluminium von dessen Kristallisationskeim Dendritenstämmen (durchgezogene rote Linien) in vier Richtungen gewachsen sind mit seitlich abgezweigten Dendritenarmen (punktierte rote Linien).



Die Gefügeausbildung einer unveredelten AlSi-Legierung, **Bild 4a**, verdeutlicht die oben gemachte Aussage, dass die Messung des Dendritenarmabstandes nur von geschultem Fachpersonal sicher durchgeführt werden kann. Für schnell erstarrte Gefüge (z. B. Druckguss) gelten ähnliche Einschränkungen, siehe **Bild 4b**.

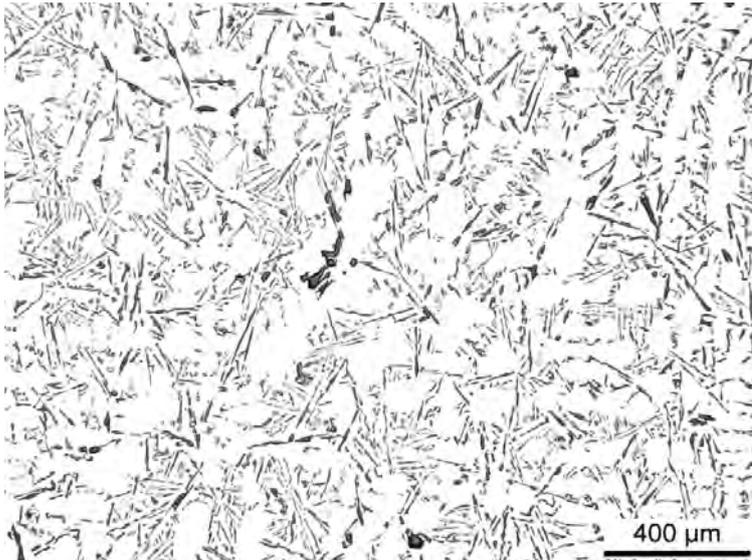


Bild 4a: Gefügeausbildung einer unveredelten untereutektischen AlSi-Gusslegierung

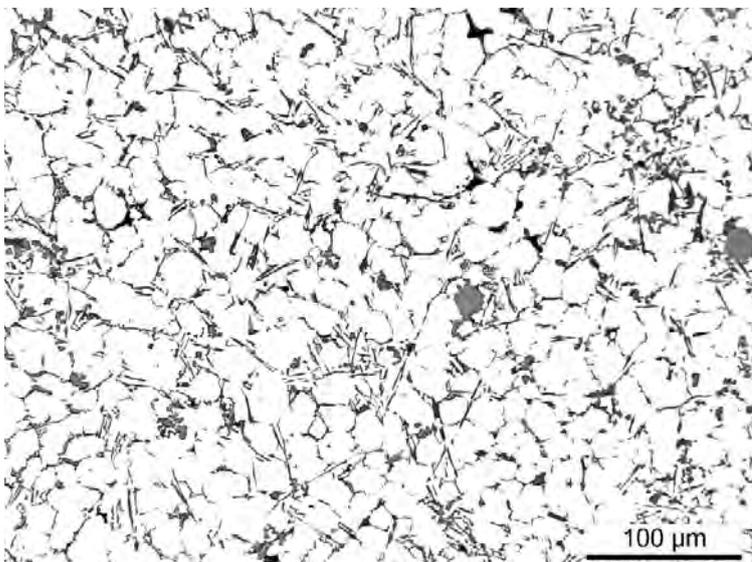


Bild 4b: Gefügeausbildung einer unveredelten untereutektischen AlSi-Gusslegierung - Druckguss

Werden Dendriten im Schliff **schräg angeschnitten**, hat dies zur Folge, dass die Messwerte immer **größer** als die realen Dendritenarmabstände sind. Geometriebedingt überschreiten in solchen Fällen die Messwerte die Dendritenarmabstände allerdings kaum um mehr als 10%.



Anhang

Weiterführende Hinweise/ Erläuterungen zur statistischen Datenanalyse und -auswertung bei der Messung des Dendritenarmabstandes

Zur Angabe eines gemittelten Dendritenarmabstandes DAS sind

- > solche Dendriten auszuwerten, die mindestens 5 nebeneinander liegende Dendritenarme aufweisen
und
- > mindestens 10 verschiedene Dendriten
(mit entsprechend unterscheidbaren Armen) heranzuziehen.

Die Auswahl der Dendriten soll so erfolgen, dass der Median des mittleren DAS einzelner Dendriten (\tilde{x}_{DAS}) und der gemittelte DAS (\bar{x}_{DAS}) um max. 0,5 μm voneinander abweichen. Für die Varianz der Dendritenarmabstände ($s_{\tilde{x}_{DAS}}^2$) können zwischen Gießerei und Abnehmer Mindestwerte vereinbart werden.

Anmerkung: Es können Mindestwerte für die Varianz gefordert werden, um sicherzustellen, dass bei der Auswahl der Dendriten ein repräsentativer Querschnitt des Gefüges ausgewählt wird, d. h. die Auswahl muss Dendritenarme mit kleinen und großen Abständen berücksichtigen. Eine einseitige Auswahl von Dendriten mit minimalen Armabständen wird dadurch verhindert. Eine geringe Varianz bedeutet andererseits aber auch, dass mit gleichbleibenden Gießbedingungen gearbeitet wurde.

Gleichungen und Ungleichungen zur statistisch abgesicherten Ermittlung des DAS

- > Mindestanzahl der zu messenden Dendriten: $n \geq 10$
- > Index der gemessenen Dendriten: $i = \{1, 2, \dots, n\}$
- > Mindestanzahl der Dendritenarme je Dendrit: $m_i \geq 5$
- > Messlänge des i-ten Dendriten: x_i (Ermittlung siehe **Bild 2**)
- > mittlerer DAS des i-ten Dendriten: $\bar{x}_{DAS_i} = \frac{x_i}{m_i - 1}$
- > gemittelter DAS: $\bar{\bar{x}}_{DAS} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{x}_{DAS_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{m_i - 1}$



- > Varianz des gemittelten DAS:
$$s_{\bar{x}_{DAS}}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{DAS_i} - \bar{\bar{x}}_{DAS})^2$$
- > der nach Größe geordnete mittlere DAS:
$$\bar{x}_{DAS_1} \leq \bar{x}_{DAS_2} \leq \dots \leq \bar{x}_{DAS_{k-1}} \leq \bar{x}_{DAS_k}$$

mit $k = \{1, 2, \dots, n\}$
- > Median der mittleren DAS:
$$\tilde{\bar{x}}_{DAS} = \begin{cases} \bar{x}_{DAS_{(\frac{k}{2})}} & , \frac{k}{2} \notin IN \\ \frac{\bar{x}_{DAS_{(\frac{k}{2})}} + \bar{x}_{DAS_{(\frac{k}{2}+1)}}}{2} & , \frac{k}{2} \in IN \end{cases}$$

mit $|\bar{\bar{x}}_{DAS} - \tilde{\bar{x}}_{DAS}| \leq 0,5 \mu m$

Anmerkung: Der Median ist der zentrale Wert einer ihrer Größe nach geordneten Zahlenreihe. Besteht eine Zahlenreihe aus einer ungeraden Zahl von Einzelwerten, ist der Median der Zahlwert der Reihenmitte (Beispiel: Bei einer Reihe von 9 ihrer Größe nach geordneten Werten, ist der Median der fünfte Wert). Bei einer Zahlenreihe mit einer geraden Anzahl von Werten ist der Median der Mittelwert aus den beiden Einzelwerten, die der Mitte der Reihe am nächsten liegen (Beispiel: bei einer Reihe aus 12 ihrer Größe nach geordneten Werten ist der Median der Mittelwert aus dem sechsten und siebten Wert).

In den vorliegenden Beispielen errechnet sich der Median der mittleren DAS als Mittelwert aus den mittleren DAS der Zeilen 5 und 6 ($k=5$ und $k=6$) der **Tabellen 2** oder **3**.

Beispiel 1 zur Ermittlung des DAS

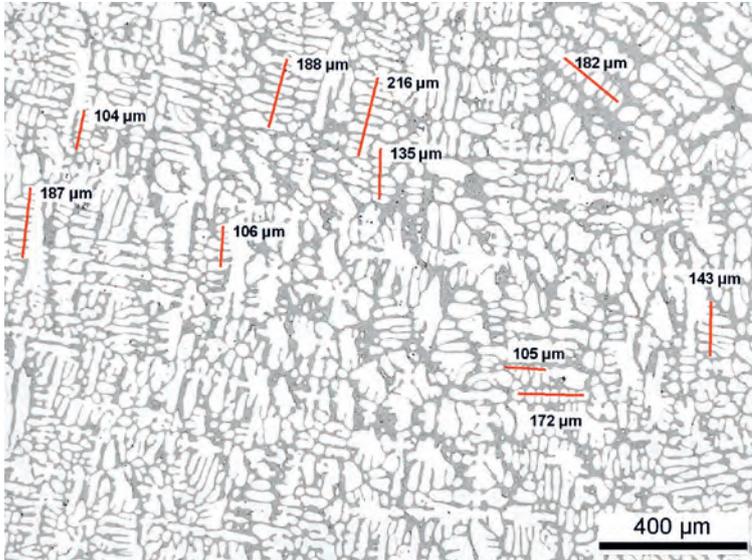


Bild 5: Gefüge eines Gusstücks mit 10 ausgewerteten Dendriten

i	X_i [μm]	n_i	\bar{X}_i [μm]
1	214	9	23,8
2	172	7	24,6
3	182	6	30,3
4	186	9	20,7
5	104	6	17,3
6	187	9	20,8
7	135	5	27,0
8	106	5	21,2
9	143	6	23,8
10	105	6	17,5
			$\bar{\bar{X}}_{DAS}$ [μm]
			22,7
			$S^2_{\bar{X}_{DAS}}$ [μm^2]
			16,5

k	i	\bar{X}_k [μm]
1	5	17,3
2	10	17,5
3	4	20,7
4	6	20,8
5	8	21,2
6	9	23,8
7	1	23,8
8	2	24,6
9	7	27,0
10	3	30,3
		$\tilde{\bar{X}}_{DAS}$ [μm]
		22,5

Tabelle 2: Resultierende Messwerte aus Bild 5.

Die Messung erfüllt die Bedingung, dass der Median des mittleren DAS einzelner Dendriten und der gemittelte DAS weniger als 0,5 μm voneinander abweichen. Im vorliegenden Fall beträgt die Differenz 0,2 μm . Die Varianz der Dendritenarmabstände beträgt 16,5 μm^2 .

$$\left| \bar{\bar{X}}_{DAS} - \tilde{\bar{X}}_{DAS} \right| = 0,2 \mu\text{m} \leq 0,5 \mu\text{m} \text{ und } s^2_{\bar{X}_{DAS}} = 16,5 \mu\text{m}^2$$

Beispiel 2 zur Ermittlung des DAS



Bild 6: Gefüge eines Gusstücks mit 10 ausgewerteten Dendriten

i	X_i [μm]	n_i	\bar{X}_i [μm]
1	242	6	40,3
2	201	5	40,2
3	279	8	34,9
4	319	10	31,9
5	256	8	32,0
6	286	9	31,8
7	186	6	31,0
8	424	12	35,3
9	140	5	28,0
10	190	7	27,1
		$\bar{\bar{X}}_{DAS}$ [μm]	33,3
		$S_{\bar{X}_{DAS}}^2$ [μm^2]	20,1

k	i	\bar{X}_k [μm]
1	10	27,1
2	9	28,0
3	7	31,0
4	6	31,8
5	4	31,9
6	5	32,0
7	3	34,9
8	8	35,3
9	2	40,2
10	1	40,3
$\tilde{\bar{X}}_{DAS}$ [μm]		32,0

Tabelle 3: Resultierende Messwerte aus Bild 6.

Die Messung erfüllt nicht die Bedingung, dass der Median des mittleren DAS einzelner Dendriten und der gemittelte DAS weniger als $0,5 \mu\text{m}$ voneinander abweichen. Im vorliegenden Fall beträgt die Differenz $1,3 \mu\text{m}$. Die Varianz der Dendritenarmabstände beträgt $20,1 \mu\text{m}^2$.

$$s_{\bar{X}_{DAS}}^2 = 20,1 \mu\text{m}^2 \quad \text{aber} \quad 0,5 \mu\text{m} \leq \left| \bar{\bar{X}}_{DAS} - \tilde{\bar{X}}_{DAS} \right| = 1,3 \mu\text{m} .$$