 <p><b>VPAM</b> Vereinigung der Prüfstellen für angriffs- hemmende Materialien und Konstruktionen</p>	<p>Anschlussdokument <b>Restenergiebetrachtung &amp; Plastizitätsprüfung</b> (maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)</p>	<p><b>VPAM</b> <b>AND-ReB</b> Stand: 01.02.2021</p>
--	---	---

# **ANSCHLUSSDOKUMENT**

zur VPAM-APR


## **Restenergiebetrachtung & Plastizitätsprüfung** (maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)

# **AND-ReB**

Stand: 01.02.2021

**Herausgeber:**

Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende  
Materialien und Konstruktionen (VPAM)

	<p>Anschlussdokument  <b>Restenergiebetrachtung &amp; Plastizitätsprüfung</b>  (maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)</p>	<p><b>VPAM AND-ReB</b>  Stand: 01.02.2021</p>
---	---	---

## Erstausgabe des VPAM AND-ReB: 01.02.2021

### Standänderungsnachweis

(die alten Stände können auf der Homepage [www.vpam.eu](http://www.vpam.eu) im Richtlinienarchiv eingesehen werden)

Nr.	Änderung Datum	Änderungen erfolgten unter folgenden Ziffern

### Einleitung

In diesem Anschlussdokument wird das von der VPAM angewandte Verfahren zur Ermittlung der Restenergie hinter einem ballistischen Schutz bei einem Nicht-Durchschuss sowie dessen Bestimmung beschrieben. Dieses Anschlussdokument ist Teil der Richtlinie VPAM-APR in der jeweils gültigen Fassung im Letztstand.

Die Grundlagen für Prüfungen und/oder Konformitätsbewertungen von Materialien, Konstruktionen und Produkten, die Schutz gegen Angriffe mit Waffen bieten, sind in den „Allgemeine Prüfgrundlagen für angriffshemmende Material-, Konstruktions- und Produktprüfungen“, VPAM-APR, beschrieben.

## Inhaltsverzeichnis


<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Restenergiebetrachtung</b> .....	<b>3</b>
1.1. Verfahren mit Beschussplastilin .....	4
1.2. Konditionierung des Plastilins.....	5
1.3. Plastizitätsprüfung des Plastilins (Kugelfallverfahren P) .....	5
1.4. Ermittlung des maximalen zulässigen Verdrängungsvolumens (BSW).....	7
<b>2. Verfahren mit Seifenprüfkopf</b> .....	<b>8</b>
2.1. Konditionierung des Seifenprüfkopfs .....	8
2.2. Ermittlung des Referenzvolumens $V_e$ .....	8
<b>3. Anlagen</b> .....	<b>10</b>
Anlage 1: Beispielrechnungen .....	10

## 1 Restenergiebetrachtung

Zur Bestimmung der bei einem Nicht-Durchschuss übertragenen Restenergie hinter einem ballistischen Schutz werden plastisch verformbare Materialien verwendet (Beschussplastilin bzw. ballistische Seife), in welchen das Verdrängungsvolumen der beim Aufprall gebildeten Eindellung zu der aufgewendeten Energie proportional ist.

Dazu wird mit einem geometrischen Körper (Kugel mit bekannter Masse und bekanntem Durchmesser; Verdrängungsvolumen in Abhängigkeit von der Dellentiefe bekannt (Kugelabschnitt/Kugelsegment)), eine bestimmte Energie (potenzielle Energie aufgrund der Kugelfallhöhe) in ein konditioniertes, plastisch verformbares Material eingebracht, d.h. es ist also für dieses konditionierte, plastisch verformbare Material bekannt, welches Verdrängungsvolumen pro eingebrachte Energie erzeugt wird (Kugelfallverfahren).

Aufgrund der aufgezeigten Proportionalität lassen sich Forderungen bezüglich maximal zulässiger Restenergiewerte (z.B. VPAM-BSW, VPAM-HVN) hinter einem ballistischen Schutz (Verletzungsrisikobetrachtung) unmittelbar in ein maximal zulässiges Verdrängungsvolumen umrechnen, welches in dem konditionierten,

	<p>Anschlussdokument  <b>Restenergiebetrachtung &amp; Plastizitätsprüfung</b>  (maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)</p>	<p><b>VPAM</b>  <b>AND-ReB</b>  Stand: 01.02.2021</p>
---	---	---

plastisch verformbaren Material bei der Prüfung entstehen darf. Bei der Prüfung kann also durch Feststellung des Verdrängungsvolumens hinter dem ballistischen Schutz näherungsweise nachgewiesen werden, ob mehr (gemessenes ist größer als maximales Verdrängungsvolumen) oder weniger (gemessenes ist kleiner als maximales Verdrängungsvolumen) als die zulässige Restenergie an das konditionierte, plastisch verformbare Material abgegeben und die Richtlinienvorgabe somit erfüllt wurde.

Der Proportionalitätsfaktor zwischen maximalem Verdrängungsvolumen und durch eine Richtlinie vorgegebenen, an den Körper übertragenen Energie ist eine Funktion der Dellentiefe und wird gleichermaßen mit der Bestimmung der Plastizität des Plastilins (z.B. VPAM-BSW) bzw. des Seifenprüfkopfes (z.B. VPAM-HVN) durch das Kugelfallverfahren bestimmt.

Unter Anwendung der Formel zur Berechnung der potenziellen Energie

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

wobei  $m$  die Fallkugelmasse,  $h$  die Fallhöhe und  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  die Gravitationskonstante darstellt,

und der Formel zur Berechnung des Kugelsegmentvolumens

$$V_{Kugelsegment} = \pi \cdot t_m^2 \cdot \left( \frac{d}{2} - \frac{t_m}{3} \right)$$


mit Kugeldurchmesser  $d$  sowie Dellentiefe  $t_m$

kann ein Zusammenhang zwischen Masse und Geometrie der Kugel, dem verdrängten Volumen im plastisch verformbaren Material und schließlich der eingebrachten Energie hergestellt werden kann.

## 1.1. Verfahren mit Beschussplastilin

Es ist Beschussplastilin gemäß VPAM AND-PrM zu verwenden. Dieses muss in einen Plastilinkasten gemäß VPAM AND-PrM eingebracht werden, so dass dieser bis zur Oberkante vollständig gefüllt ist.

Das Verfahren zur Ermittlung der beim Nicht-Durchschuss an den Körper übertragenen Restenergie und die Bestimmung des maximal zulässigen Verdrängungsvolumens untergliedert sich in folgende Schritte:

	<p>Anschlussdokument  <b>Restenergiebetrachtung &amp; Plastizitätsprüfung</b>  <b>(maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)</b></p>	<p><b>VPAM</b>  <b>AND-ReB</b>  Stand: 01.02.2021</p>
---	--	---

- Konditionierung des Plastilins (VPAM-BSW, VPAM-HVN-Visier und VPAM-KDIW),
- Plastizitätsprüfung des Plastilins - Kugelfallverfahren P (VPAM-BSW, VPAM-HVN-Visier und VPAM-KDIW),
- Bestimmung des maximal zulässigen Verdrängungsvolumens (VPAM-BSW)
- richtlinienkonforme Prüfung (VPAM-BSW, VPAM-HVN-Visier und VPAM-KDIW) – siehe dort

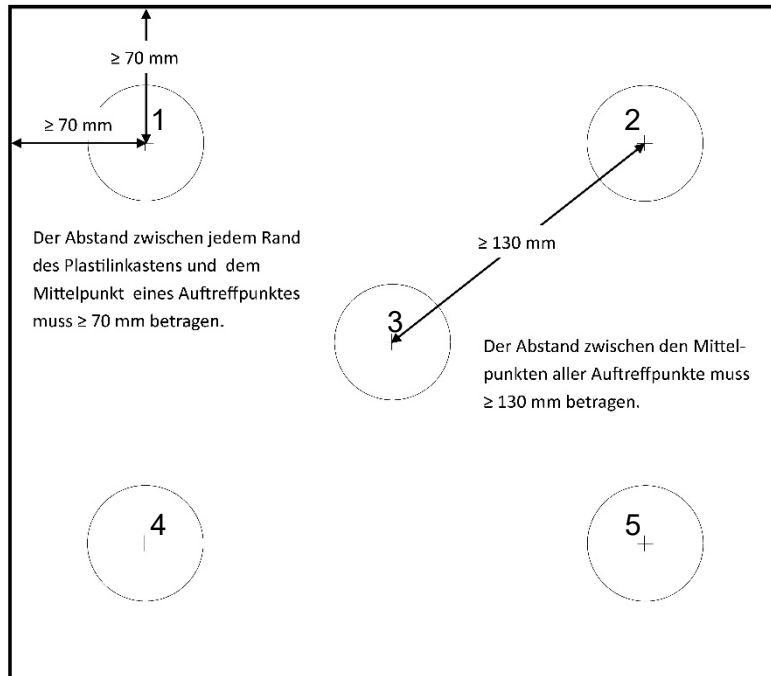
## 1.2. Konditionierung des Plastilins

Der mit Plastilin ausgefüllte Kasten muss vor der Prüfung mindestens 16 h bei konstanter Temperatur, eingelagert werden. Dabei ist die Temperatur so einzustellen, dass die im nächsten Abschnitt angeführte Plastizität gewährleistet ist.

## 1.3. Plastizitätsprüfung des Plastilins (Kugelfallverfahren P)

Als Vorbehandlung und zur Vermeidung von Lufteinschlüssen muss das Plastilin im Kasten vor der Plastizitätsmessung gleichmäßig mobilisiert werden. Hierzu ist das Plastilin z.B. mit einem Holzhammer (ca. 30 Schlägen) oder einer gleichwertigen Methode zu bearbeiten.

Zur Prüfung ist der Kasten mit dem Plastilin auf einer ausreichend festen Grundfläche (z.B. Betonfußboden oder entsprechend massiver Unterbau) aufzustellen und das Plastilin bündig mit der Oberkante des Kastens abzuziehen. Zur Prüfung der Plastizität des Plastilins ist eine Fallvorrichtung mit einer Stahlkugel (Durchmesser  $63,5 \pm 0,1\text{mm}$ , Masse  $1039 \pm 10\text{g}$ ) einzusetzen. Der Abstand zwischen Kugelunterkante und der Oberfläche des Plastilins muss zum Beginn der Prüfung  $2000 \pm 10\text{mm}$  betragen. Die Kugel muss fünfmal lotrecht und in Folge gemäß Abbildung 1 auf dem Plastilin auftreffen. Nach jedem Kugelfall ist das Plastilin so abzuziehen, dass die bei der Verdrängung entstandenen Wülste abgetragen werden und anschließend ist die Eindruck-/Dellentiefe zu messen. Der so ermittelte Wert ist stets auf die nächste 0,5-Stelle aufzurunden. Die entstandenen Mulden sind während der Plastizitätsprüfung nicht aufzufüllen.



**Abbildung 1:** Die 5 Auftreffpunkte der Plastizitätsprüfung des Plastilins mit den einzuhaltenden Abständen.

Die Anforderungen an die Plastizität sind erfüllt, wenn die Dellentiefen der fünf Fallproben einen Mittelwert  $\bar{t}_m$  von  $20 \pm 2$  mm ergeben und kein Einzelwert außerhalb des Bereichs  $20 \pm 3$  mm liegt.

Sollte diese Forderung nicht erfüllt sein ist erneut zu konditionieren, bis die Anforderung an die Plastizität erfüllt ist oder neues Plastilin zu verwenden. Gleiches gilt, wenn der Prüfer während der Prüfung eine Veränderung der Plastizität bemerkt.

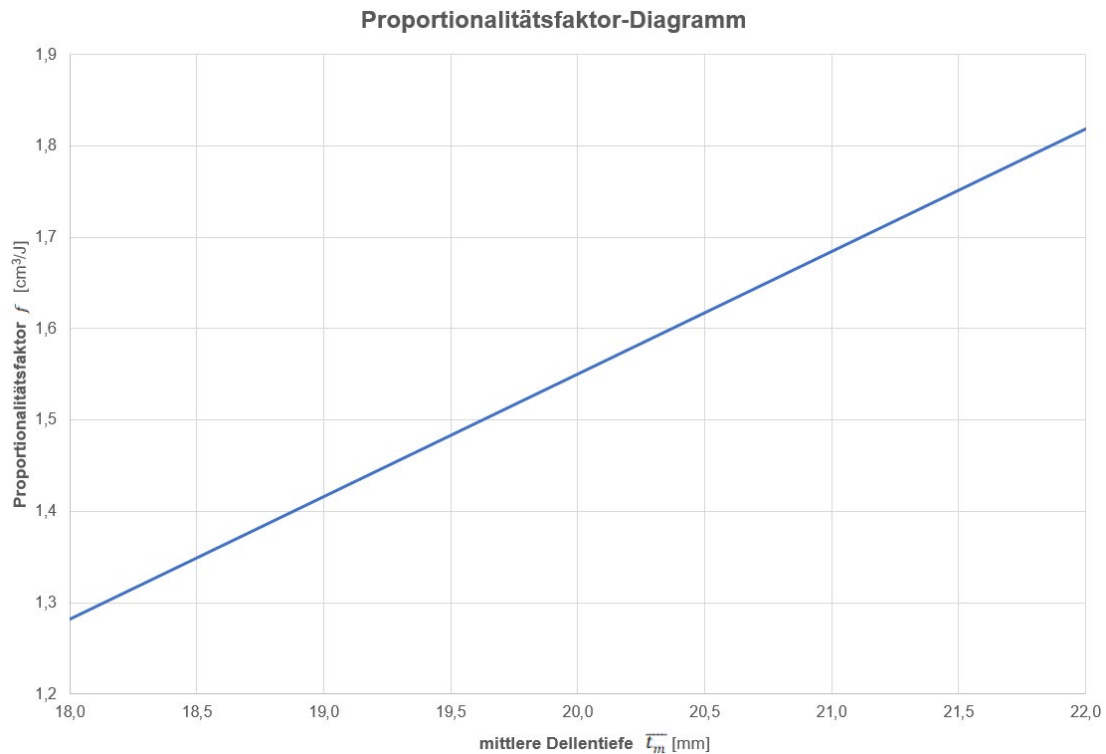
Das Ergebnis der Plastizitätsüberprüfung ist somit eine mittlere Dellentiefe  $\bar{t}_m$ .

Mit Hilfe dieser mittlerer Dellentiefe  $\bar{t}_m$  kann mit den obigen Formeln und auf Grund der Kugelparameter ein Proportionalitätsfaktor  $f$  [ $\text{cm}^3/\text{J}$ ] ermittelt werden

$f = \text{Kugelsegmentvolumen} : \text{potenzielle Energie}$

$$f = (0,134 \cdot \bar{t}_m - 1,13)$$

Für unterschiedliche mittlerer Dellentiefen  $\bar{t}_m$  kann auch das folgende, unmittelbar anwendbare Proportionalitätsfaktor-Diagramm (Abbildung 2) erstellt werden:



**Abbildung 2:** Proportionalitätsfaktor  $f$  als Funktion der mittleren Dellentiefe  $\bar{t}_m$ .

In Anlage 1 befinden sich Beispielrechnungen.


#### **1.4. Ermittlung des maximalen zulässigen Verdrängungsvolumens (BSW)**

Mit Hilfe der während der Plastizitätsprüfung des Plastilins ermittelten mittleren Dellentiefe  $\bar{t}_m$  [mm] kann nun das maximal zulässige Verdrängungsvolumen  $V_{zul}$  [cm³] der gebildeten Eindellung hinter dem Schutz bestimmt werden, wobei einerseits der Proportionalitätsfaktor  $f$  wie folgt mit dem während der Fallversuche ermittelten mittleren Dellentiefe  $\bar{t}_m$  [mm] und andererseits der jeweils laut Richtlinie (z.B. BSW) vorgegebenen, maximal zulässigen Energieübertragung an den Körper  $E_{zul}$  heranzuziehen ist:

$$V_{zul} = f \cdot E_{zul} = (0,134 \cdot \bar{t}_m - 1,13) \cdot E_{zul}$$

Das so ermittelte, maximal zulässige Verdrängungsvolumen  $V_{zul}$  der gebildeten Eindellung hinter dem Schutz wird auf die nächsten ganzen cm³ aufgerundet und steht somit für die Prüfung als Kriterium (bestanden / nicht bestanden) zur Verfügung.

In Anlage 1 befinden sich Beispielrechnungen.

	<p>Anschlussdokument  <b>Restenergiebetrachtung &amp; Plastizitätsprüfung</b>  (maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)</p>	<p><b>VPAM</b>  <b>AND-ReB</b>  Stand: 01.02.2021</p>
---	---	---

*Hinweis:*

*Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sind bei der Prüfung nach jedem Schuss zunächst die, um die Delle entstandenen Wülste plan abzuziehen und das entstandene Volumen sodann zu bestimmen. Die Delle wird dazu beispielsweise mit einer das Plastilin nicht angreifenden Flüssigkeit (z.B. Wasser) gefüllt und das dafür benötigte Volumen schließlich gemessen. Mit Hilfe einer Rückrechnung (unter Anwendung der Kugelsegmentformel und der Formel zur Energieübertragung) kann auch die hinter einem ballistischen Schutz an den Körper beim Nicht-Durchschuss übertragene, vorhandene Restenergie  $E_{vorh}$  näherungsweise bestimmt werden:*

$$E_{vorh} = \frac{V_{vorh}}{f} = \frac{V_{vorh}}{(0,134 \cdot t_m - 1,13)}$$

## 2. Verfahren mit Seifenprüfkopf

Es ist ein Kopf aus ballistischer Seife gemäß VPAM AND-PrM zu verwenden.

Das Verfahren zur Ermittlung der beim Nicht-Durchschuss an den Kopf übertragenen Restenergie und die Bestimmung des maximal zulässigen Verdrängungsvolumens untergliedert sich in folgende Schritte:

- Konditionierung des Seifenprüfkopfs (VPAM-HVN),
- richtlinienkonforme Prüfung (VPAM-HVN) – siehe dort
- Ermittlung des Referenzvolumens  $V_e$  (VPAM-HVN) - Kugelfallverfahren S
- Ermittlung der übertragenen Restenergie auf den Seifenprüfkopf (VPAM-HVN)

### 2.1. Konditionierung des Seifenprüfkopfs

Der Seifenprüfkopf muss vor der Prüfung mindestens 16 h bei konstanter Temperatur ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ), eingelagert werden.

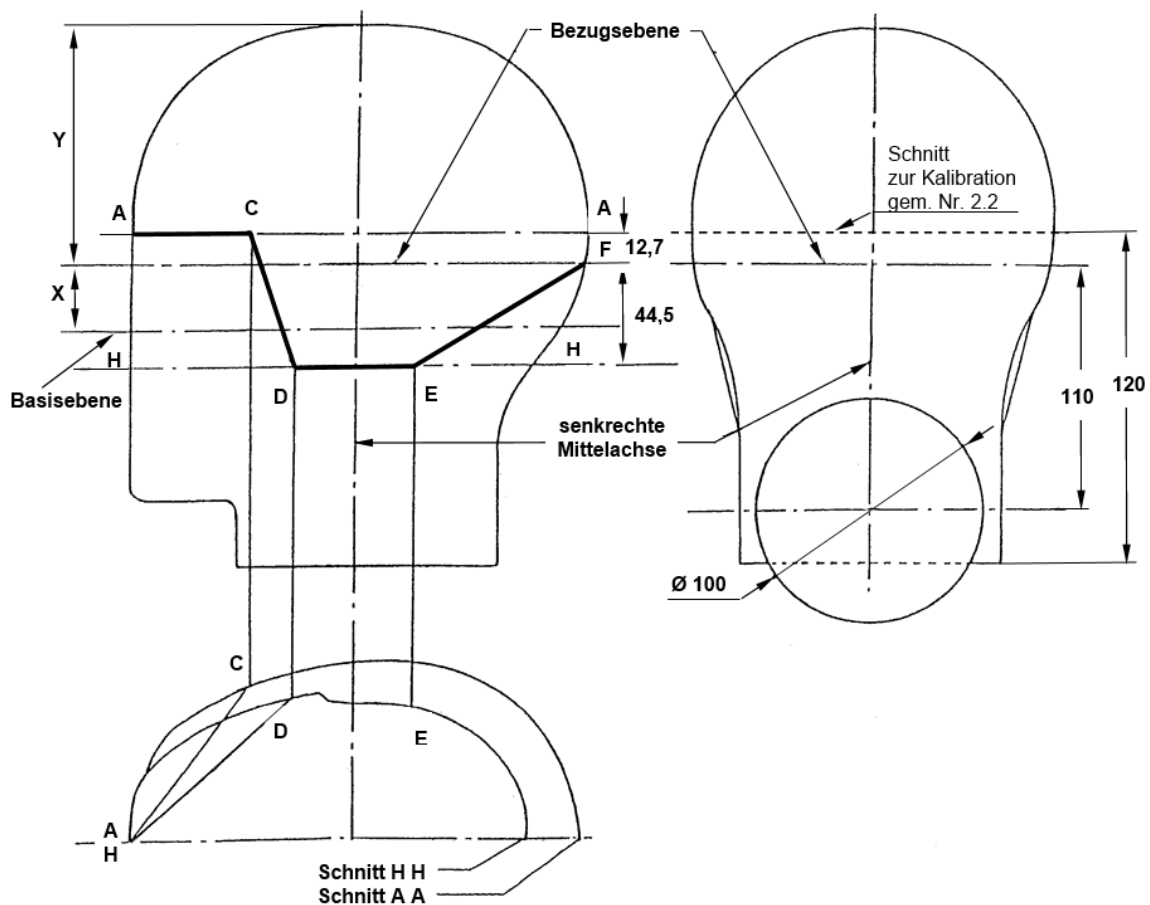
### 2.2 Ermittlung des Referenzvolumens $V_e$

Die Ermittlung der an den Kopf übertragenen Restenergie bei Nicht-Durchschuss eines Helmes benötigt zur Kalibration des Messergebnisses ein Referenzvolumen  $V_e$ , welches folgendermaßen ermittelt wird.

Die Bestimmung dieses Volumens ist, nach Ausmessen des Volumens  $V_p$  [ $\text{cm}^3$ ] der durch die Helmausbeulung im Messkopf gebildeten Delle (entsprechend Richtlinie



HVN), am selben Messkopf vorzunehmen und erfolgt mittels der Prüfeinrichtung zur Prüfung der Plastizität des Plastilins (siehe Abschnitt 1.2). Dazu ist der Messkopf nach der Prüfung entsprechend der *Abbildung 3* zu zerschneiden, die Kugel einmal mittig auf die Schnittfläche des unteren Kopfbereichs fallen zu lassen und das dabei erzeugte Volumen  $V_e$  [cm<sup>3</sup>] zu ermitteln.



**Abbildung 3:** Seifenprüfkopf mit Hauptabmessungen und Lage des Schnitts für die Kalibrationsfläche.

### 2.3 Ermittlung der Restenergie auf den Seifenprüfkopf

Mit Hilfe des durch die Kugel beim Falltest erzeugten Volumens  $V_e$  [cm<sup>3</sup>] und das durch die Prüfung nach Richtlinie erzeugte Volumen  $V_p$  [cm<sup>3</sup>] ergibt sich die übertragene Energie  $E_p$  [J] zu:

$$E_p = 20,4 \cdot \frac{V_p}{V_e}$$

In Anlage 1 befinden sich Beispielrechnungen.

### 3. Anlagen

#### Anlage 1: Beispielrechnungen

##### Beispiel 1:

Bei der Plastizitätsüberprüfung wurden folgende Werte ermittelt:

$$t_{m1} = 21,7\text{mm} \Rightarrow \text{Rundung} \Rightarrow 22,0\text{mm}$$

$$t_{m2} = 21,9\text{mm} \Rightarrow \text{Rundung} \Rightarrow 22,0\text{mm}$$

$$t_{m3} = 20,8\text{mm} \Rightarrow \text{Rundung} \Rightarrow 21,0\text{mm}$$

$$t_{m4} = 22,2\text{mm} \Rightarrow \text{Rundung} \Rightarrow 22,5\text{mm}$$

$$t_{m5} = 21,8\text{mm} \Rightarrow \text{Rundung} \Rightarrow 22,0\text{mm}$$

$$\bar{t}_m = \frac{t_{m1} + t_{m2} + t_{m3} + t_{m4} + t_{m5}}{5} = \frac{22,0 + 22,0 + 21,0 + 22,5 + 22,0}{5} = 21,9\text{mm}$$

Es ergibt sich ein mittlere Dellentiefe  $\bar{t}_m$  von 21,9mm, die Plastizitätsvoraussetzung ist, wenn auch im oberen Bereich, erfüllt. Die Plastizität muss während der Prüfung speziell im Auge behalten und ggf. überprüft werden.

##### Beispiel 2:

Bei der Plastizitätsüberprüfung wurden folgende Werte ermittelt:

$$t_{m1} = 21,0\text{mm}$$

$$t_{m2} = 21,5\text{mm}$$

$$t_{m3} = 20,5\text{mm}$$

$$t_{m4} = 19,5\text{mm}$$

$$t_{m5} = 19,0\text{mm}$$

$$\bar{t}_m = \frac{t_{m1} + t_{m2} + t_{m3} + t_{m4} + t_{m5}}{5} = \frac{21,0 + 21,5 + 20,5 + 19,5 + 19,0}{5} = 20,3\text{mm}$$

Es ergibt sich ein mittlere Dellentiefe  $\bar{t}_m$  von 20,3mm, die Plastizitätsvoraussetzung ist erfüllt. Die Plastizität muss während der Prüfung im Auge behalten und ggf. überprüft werden.

##### Beispiel 3:

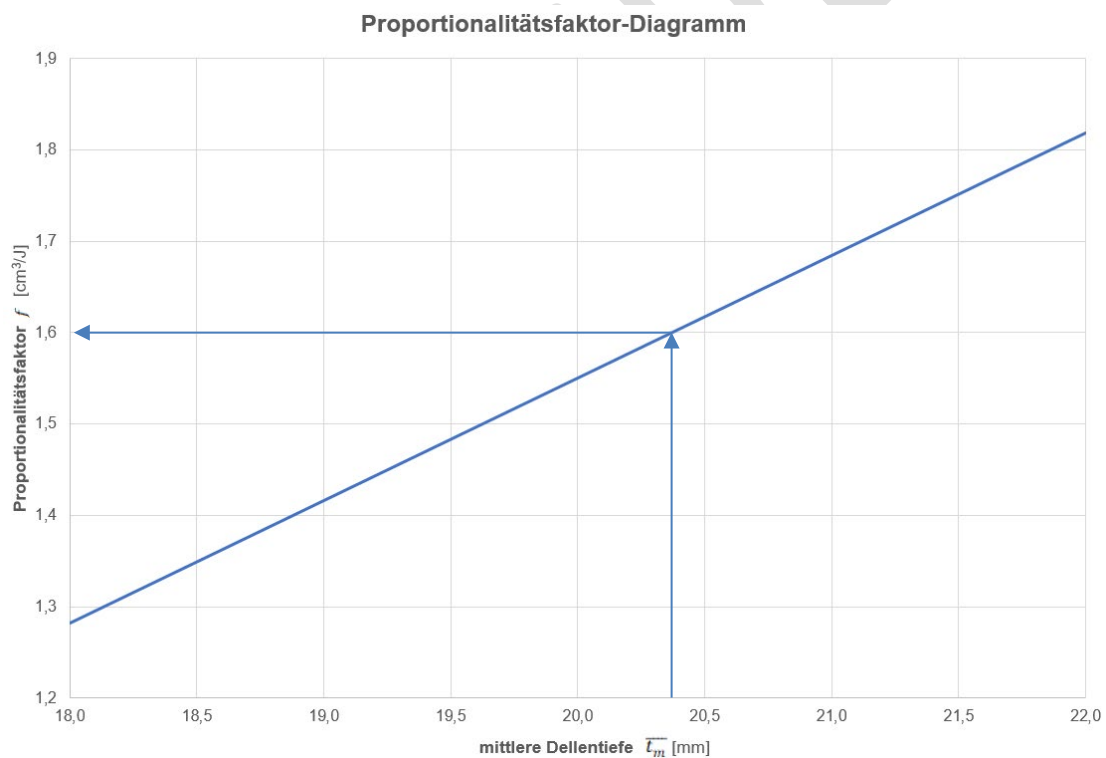
Gilt für die zulässige, an den Körper zu übertragende Energie  $E_{zul}=70\text{J}$  und wurde bei der Plastizitätsmessung eine mittlere Dellentiefe von 20,4mm gemessen, so

ergibt sich als maximal zulässiges Volumen der gebildeten Eindellung hinter dem ballistischen Schutz (aufrunden auf die nächsten ganzen  $\text{cm}^3$ ):

$$\begin{aligned}
 V_{zul} &= f \cdot E_{zul} = (0,134 \cdot \bar{d}_m - 1,13) \cdot E_{zul} = (0,134 \cdot 20,4 - 1,13) \cdot 70 = \\
 &= 1,604 \cdot 70 = 112,3 \text{cm}^3 = 113 \text{cm}^3
 \end{aligned}$$

Anstelle der Formel kann zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors  $f$  auch das Diagramm aus Abbildung 2, wie in Abbildung 3 zu sehen, verwendet werden.

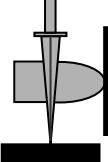
Dellentiefe  $\bar{t}_m = 20,4 \text{mm} \Rightarrow$  Diagramm  $\Rightarrow$  Proportionalitätsfaktor  $f = 1,6$



**Abbildung 2:** Proportionalitätsfaktor  $f$  als Funktion der mittleren Dellentiefe  $\bar{t}_m$ .

#### Beispiel 4:

Bei einer Restenergiebestimmung nach VPAM-HVN wurde im Seifenprüfkopf ein Volumen  $V_p = 6,5 \text{cm}^3$  bestimmt. Bei der Kalibration am gleichen, zerschnittenen Seifenprüfkopf wurde mittels des Kugelfallverfahren S ein Referenzvolumen von  $V_e = 5,7 \text{cm}^3$  bestimmt.

 <p><b>VPAM</b> Vereinigung der Prüfstellen für angriffs- hemmende Materialien und Konstruktionen</p>	<p>Anschlussdokument <b>Restenergiebetrachtung &amp; Plastizitätsprüfung</b> (maximales Verdrängungsvolumen, Restenergiebestimmung)</p>	<p><b>VPAM</b> <b>AND-ReB</b> Stand: 01.02.2021</p>
--	---	---

Die an den Seifenprüfkopf übergebene Energie beträgt somit

$$E_p = 20,4 \cdot \frac{V_p}{V_e} = 20,4 \cdot \frac{6,5}{5,7} = 23,3J$$

Die laut VPAM-HVN Stand: 04.04.2017 vorgegebene maximal übertragene Energiegrenze von 25J wurde damit nicht erreicht; der Helm erfüllt somit dieses Bewertungskriterium der Prüfung nach VPAM-HVN.