



## **Forschungsbericht**

# *Sicherheitstechnische Kenngrößen von Stäuben bei nicht-atmosphärischen Bedingungen*

---

DEKRA EXAM GmbH

Dinnendahlstraße 9

44809 Bochum

Bearbeiter: Dr. Ute Hesener

Matthias Beck

Benjamin Kampe

Zeichen: 13EXAM 11248 BVS-Hes/Bk/Kam

Laufzeit: 01.10.2013 bis 31.12.2014

Stand: 24. März 2015

## Inhaltsverzeichnis

1	Abstract .....	1
2	Mitglieder des Forschungsbeirates .....	4
3	Veranlassung für das Forschungsvorhaben .....	5
4	Methodik .....	6
5	Kenngrößen abgelagerter Stäube.....	7
5.1	Brennzahl.....	7
5.1.1	Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen .....	7
5.1.2	Empfehlung .....	8
5.2	Glimmtemperatur.....	8
5.2.1	Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen .....	9
5.2.2	Empfehlung .....	9
5.3	Selbstentzündungstemperatur .....	10
5.3.1	Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen .....	11
5.3.2	Empfehlung .....	15
6	Kenngrößen aufgewirbelter Staub/Luft-Gemische .....	17
6.1	Zündtemperatur aufgewirbelter Staub/Luft-Gemische.....	17
6.1.1	Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen .....	17
6.1.2	Empfehlung .....	18
6.2	Mindestzündenergie.....	18
6.2.1	Abhängigkeit der Mindestzündenergie von der Sauerstoffkonzentration .....	19
6.2.2	Empfehlung zur Sauerstoffabhängigkeit der Mindestzündenergie .....	21
6.2.3	Abhängigkeit der Mindestzündenergie von der Umgebungstemperatur.....	22
6.2.4	Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit der Mindestzündenergie .....	24
6.2.5	Abhängigkeit der Mindestzündenergie vom Anfangsdruck.....	25
6.2.6	Empfehlung zur Druckabhängigkeit der Mindestzündenergie.....	26

## Inhaltsverzeichnis

6.2.7	Übersicht über die Abhängigkeit der Mindestzündenergie von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration .....	27
6.3	Explosionsfähigkeit .....	27
6.4	Untere Explosionsgrenze .....	27
6.4.1	Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze von der Sauerstoffkonzentration .	28
6.4.2	Empfehlung zur Sauerstoffabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze .....	28
6.4.3	Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze von der Temperatur .....	29
6.4.4	Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze .....	31
6.4.5	Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze vom Anfangsdruck .....	32
6.4.6	Empfehlung zur Druckabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze .....	33
6.4.7	Übersicht über die Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration .....	33
6.5	Sauerstoffgrenzkonzentration .....	33
6.5.1	Abhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration von der Temperatur .....	34
6.5.2	Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration ...	36
6.5.3	Abhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration vom Anfangsdruck .....	36
6.5.4	Empfehlung zur Druckabhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration .....	37
6.5.5	Übersicht über die Abhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration .....	37
6.6	Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert .....	38
6.6.1	Abhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes vom Anfangsdruck .....	38
6.6.2	Empfehlung zur Druckabhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes .....	41
6.6.3	Abhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes von der Temperatur .....	41
6.6.4	Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes .....	43

## Inhaltsverzeichnis

6.6.5	Abhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes von der Sauerstoffkonzentration .....	44
6.6.6	Empfehlung zur Sauerstoffabhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes.....	48
6.6.7	Übersicht über die Abhängigkeiten des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration .....	48
7	Literaturverzeichnis.....	50
8	Abbildungsverzeichnis .....	55
9	Tabellenverzeichnis.....	57
10	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....	58

## 1 Abstract

Zur Ermittlung der explosionstechnischen Eigenschaften von brennbaren Stäuben werden sicherheitstechnische Kenngrößen ermittelt. Die Kenntnis dieser Kenngrößen ist für die Beurteilung von Explosionsgefahren in staubverarbeitenden verfahrenstechnischen Anlagen unabdingbar. Ermittelt werden die Kenngrößen von abgelagerten und aufgewirbelten Stäuben in Staublaboren unter Standardbedingungen und gelten in einem sog. atmosphärischen Bereich. Da jedoch viele staubverarbeitende Prozesse Betriebsbedingungen benötigen, welche außerhalb des atmosphärischen Bereichs liegen, und die im Labor ermittelten Kenngrößen keine Konstanten darstellen, ist es erforderlich, Kenntnis über die Kenngrößen unter den vorherrschenden Prozessbedingungen zu besitzen. Ziel des vorliegenden Forschungsberichts war daher die Ermittlung gültiger Abschätzmethoden durch eine Literaturrecherche, um ausgehend von den im Labor ermittelten Kenngrößen den Wert der jeweiligen Kenngröße außerhalb der atmosphärischen Bedingungen zu bestimmen. An den Stellen, welche nicht in der Literatur untersucht wurden, werden tendenzielle Abschätzungen auf Basis physikalisch/chemischer Zusammenhänge bzw. durch Praxiserfahrung gegeben.

Eine orientierende Übersicht des ermittelten tendenziellen Verhaltens ist in Tabelle 1 aufgeführt. In Tabelle 2 findet sich eine Aufzählung von sich aus diesem Forschungsbericht ergebenden Forschungsbedarf, welcher mit einfachen Untersuchungen im Labor gedeckt werden kann.

## Abstract

**Tabelle 1: Übersicht des tendenziellen Verhaltens der betrachteten Kenngrößen**

Kenngröße	Druck			Temperatur		Sauerstoffvolumenanteil		
	≤ 0,8 bar abs.	≥ 1,1 bar abs.	Abschätzmethoden vorhanden?	> 25 °C	Abschätzmethoden vorhanden?	< 21 Vol.-%	> 21 Vol.-%	Abschätzmethoden vorhanden?
Brennzahl/ Brennverhalten	nicht kritischer	kritischer	Nein	kritischer	Nein	konstant	kritischer	Nein
Glimmtemperatur	konstant	keine Erkenntnisse	Nein	Abnahme	Nein	Zunahme	Abnahme	Nein
Selbstentzündungs- temperatur	konstant	keine Erkenntnisse	Nein	entfällt	entfällt	Zunahme	Abnahme	Nein
Zündtemperatur	konstant	keine Erkenntnisse	Nein	keine Erkenntnisse	keine Erkenntnisse	Zunahme	Abnahme	Nein
Mindestzündenergie	keine Erkenntnisse	Abnahme	Nein	Abnahme	Ja, s. Gl. (2) + (3)	Zunahme	Abnahme	Ja, s. Gl. (1)
Untere Explosionsgrenze	Abnahme	Zunahme	Ja, lineare Interpolation	Abnahme	Ja, s. Gl. (7)	konstant	konstant	-
Sauerstoffgrenz- konzentration	keine Erkenntnisse	Abnahme	Nein	Abnahme	Ja, s. Gl. (12)	entfällt	entfällt	entfällt
Maximaler Explosionsdruck	Abnahme	Zunahme	Ja, s. Gl. (15)	Abnahme	Ja, s. Gl. (17) + (18)	Abnahme	Zunahme	Ja, s. Gl. (21)
K <sub>St</sub> -Wert	Abnahme	Zunahme	Ja, s. Gl. (16)	Zunahme für K <sub>St</sub> < 100 $\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ Abnahme für K <sub>St</sub> > 150 $\frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$		Abnahme	Zunahme	Nein

## Abstract

**Tabelle 2: Forschungsbedarf: mit begrenztem experimentellem Aufwand**

Kenngröße	Forschungsbedarf	Aufwand
Glimmtemperatur	Temperatur	Ggf. können erhöhte Umgebungstemperaturen durch Verwendung der angepassten Glimmplatte in einem Ofen berücksichtigt werden.
Zündtemperatur	Sauerstoffvolumenanteil	Ggf. können andere Sauerstoffvolumenanteile durch Verwendung des Zündtemperaturofens in einer Glovebox berücksichtigt werden.
Mindestzündenergie	Temperatur	Die Temperaturabhängigkeit der Mindestzündenergie sollte durch weitere Versuche detaillierter ermittelt werden, der apparative Einfluss Hartmannrohr ↔ 20 l-Kugel sollte berücksichtigt werden
Explosionsfähigkeit	Druck, Temperatur, Sauerstoffvolumenanteil	Messungen im 1 m <sup>3</sup> -Behälter bzw. 20 l-Kugel möglich
Untere Explosionsgrenze von Metallstäuben	Druck, Temperatur, Sauerstoffvolumenanteil (> 21 Vol.-%)	Messungen im 1m <sup>3</sup> -Behälter bzw. 20 l-Kugel unter Berücksichtigung der Apparaturenfestigkeit möglich
Sauerstoffgrenzkonzentration von Metallstäuben	Druck, Temperatur, Sauerstoffvolumenanteil	Messungen im 1m <sup>3</sup> -Behälter bzw. 20 l-Kugel unter Berücksichtigung der Apparaturenfestigkeit möglich
Maximaler Explosionsdruck von Metallstäuben	Druck, Temperatur, Sauerstoffvolumenanteil	Messungen im 1m <sup>3</sup> -Behälter bzw. 20 l-Kugel unter Berücksichtigung der Apparaturenfestigkeit möglich
K <sub>St</sub> -Wert	Temperatur	Die von Glarner aufgestellte These sollte überprüft werden.
K <sub>St</sub> -Wert von Metallstäuben	Druck, Temperatur, Sauerstoffvolumenanteil	Messungen im 1m <sup>3</sup> -Behälter bzw. 20 l-Kugel unter Berücksichtigung der Apparaturenfestigkeit möglich

## 2 Mitglieder des Forschungsbeirates

Herr Björn Poga	BG Rohstoffe und chemische Industrie
Herr Roland Knopp	BG Holz und Metall
Herr Dr. Albrecht Vogl	BG Nahrungsmittel und Gaststätten
Herr Dr. Martin Schmidt	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung
Herr Dr. Johannes Fischer	BASF SE
Herr Dr. Markus Gödde	BASF SE
Herr Dr. Hans-Peter Schildberg	BASF SE
Herr Dr. Uwe Heinz	Bayer Technology Services GmbH
Herr Dr. Jürgen Franke	Consilab Gesellschaft für Anlagensicherheit mbH
Herr Joachim Lucas	IBExU Institut für Sicherheitstechnik GmbH
Herr Dr. Klaus-Werner Stahmer	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
Herr Martin Gosewinkel	Inburex Consulting GmbH
Herr Dr. Thomas Zimmermann	Merck KGaA
Frau Dr. Elisabeth Brandes	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Herr Dr. Marc Scheid	Syngenta Crop Protection Münchwilen AG
Frau Dr. Ute Hesener	Dekra Exam GmbH
Herr Benjamin Kampe	Dekra Exam GmbH
Herr Matthias Beck	Dekra Exam GmbH

Dieses Forschungsvorhaben wurde finanziell gefördert von der BG RCI. Die Mitglieder des Forschungsbeirates unterstützten das Vorhaben durch die aktive fachliche Mitarbeit. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Beteiligten herzlich für die Mitarbeit bedanken.



### 3 Veranlassung für das Forschungsvorhaben

In den harmonisierten Normen unter der europäischen Richtlinie 94/9/EG<sup>1</sup> sind Bestimmungsmethoden für folgende Kenndaten beschrieben:

- Mindestzündtemperatur einer 5 mm Schicht
- Selbstzündtemperatur durch Warmlagerversuche
- Mindestzündtemperatur einer Staubwolke
- Mindestzündenergie
- Untere Explosionsgrenze
- Sauerstoffgrenzkonzentration
- Maximaler Explosionsdruck und  $K_{St}$ -Wert

Neben diesen Kenngrößen, die nach normierten Verfahren bestimmt werden, sind weitere Kenngrößen bekannt, wie z.B. in der VDI 2263 Blatt 1 [1] beschrieben.

Der Leitfaden der Richtlinie 94/9/EG [2] beschreibt atmosphärische Bedingungen mit Drücken zwischen 800 mbar und 1100 mbar sowie Temperaturen von -20 °C bis 60 °C innerhalb einer Luftatmosphäre. In der Anwendung der Kenngrößen in diesen Intervallen, ist zu beachten, dass die Kenngrößen keinesfalls als konstant angesehen werden können. Das Verhalten eines abgelagerten oder aufgewirbelten Staubes kann bereits innerhalb des atmosphärischen Bereichs kritischer werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll mittels Literaturrecherche geklärt werden, ob für die einzelnen Staubkenngrößen Abschätzverfahren vorhanden sind, die es erlauben, ausgehend von den bei atmosphärischen Bedingungen mit den genormten Bestimmungsverfahren ermittelten Kenngrößen, Kenngrößen für nicht-atmosphärische Bedingungen abzuschätzen.

---

<sup>1</sup> Ab 20. April 2016 gilt die neue ATEX Richtlinie 2014/34/EU; Die Bestimmungsmethoden der Kenndaten bleiben unverändert.

### 4 Methodik

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden ca. 150 Veröffentlichungen gesichtet. Davon stellten sich ca. 45 als nutzbare Quellen heraus. Diese befassen sich vornehmlich mit den sicherheitstechnischen Kenngrößen von organischen Stäuben. Über das Verhalten der sicherheitstechnischen Kenngrößen von Metallstäuben existiert nur ein Bericht von Kuai [3].

Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Literaturrecherche im Forschungsbeirat diskutiert, so dass die Erfahrung der Mitglieder des Forschungsbeirates in diesen Forschungsbericht einfließen konnte, soweit dies außerhalb von geltenden Geheimhaltungsvereinbarungen möglich war. Diese Erfahrung spiegelt sich in diesem Forschungsbericht in Vermutungsformulierungen wieder. Eingbracht sind diese an den Stellen, welche durch die Literatur nur unzureichend oder gar nicht abgedeckt werden.

Die gefundenen Abschätzmethode wurden insoweit überprüft, als dass die den Gleichungen zugrunde liegenden Messwerte wieder in die Gleichungen eingesetzt wurden. Um dem Leser ein Gefühl für die Genauigkeit der Gleichungen zu vermitteln, sind in den einzelnen Kapiteln die Vergleiche zwischen den experimentellen Messwerten und den berechneten Werten in Diagrammen angegeben. In allen Fällen, in denen Abschätzformeln vorliegen, basieren diese auf einer begrenzten Menge von Messdaten und gelten streng genommen nur für die genutzten Stäube. Die Übertragung auf andere Stäube ist daher nur nach genauer Abwägung möglich. Fast alle Untersuchungen sind mit organischen Stäuben durchgeführt worden. Da für Metallstäube keine expliziten Untersuchungen durchgeführt wurden und der Oxidationsprozess im Vergleich zu organischen Stäuben ein anderer ist, ist eine Übertragung auf Metallstäube grundsätzlich nicht möglich. An den Stellen, wo nach Erfahrung des Forschungsbeirates zu erwarten ist, dass sich Metallstäube ähnlich wie organische Stäube verhalten, ist dies besonders vermerkt.

Weiterhin gelten die in diesem Bericht beschriebenen Abhängigkeiten nur für Oxidationsprozesse zwischen organischen Stäuben mit dem Sauerstoff aus der Luft. Oxidationsreaktionen, bei denen der Sauerstoff aus der Zersetzungsreaktion der Stäube stammt oder bei denen andere Reaktionspartner als Sauerstoff auftreten, sind durch die in diesem Bericht beschriebenen Abhängigkeiten nicht abgedeckt. Für andere Reaktionsmechanismen sind Einzelbetrachtungen erforderlich. Explosionsgefährliche Stoffe gemäß CLP-Verordnung [4] sind ausgenommen. Die Anwendung der Empfehlungen für sauerstoffreduzierte Systeme können prinzipiell auf alle gängigen Inertgase angewandt werden. Hierbei sind jedoch die Edelgase ausgenommen.

## 5 Kenngrößen abgelagerter Stäube

### 5.1 Brennzahl

Die Brennzahl dient der qualitativen Einschätzung des stoffspezifischen Brennverhaltens des abgelagerten Staubes bei Kontakt mit einer Zündquelle wie z. B. Funken, Schweißperlen oder auch Glimmnestern.

Es existiert bislang keine Norm zur Bestimmung der Brennzahl im Labor.

Nach der VDI Richtlinie 2263 Blatt 1 [1] erfolgt die Bestimmung der Brennzahl an einer definierten Schüttung. Als Versuchsunterlage dient eine hitzebeständige Keramikplatte. Als Zündinitial wird entweder ein auf 1000 °C aufgeheizter Platindraht oder flüchtig wirkende Zündquellen wie kleine Brennerflammen mit wenigen Zentimetern Länge genutzt. Zudem besteht die Möglichkeit die Staubschüttung mit Hilfe einer Schüttrinne zu bilden und anschließend in einem horizontalen Glaszylinder zu untersuchen. Die Überströmungsgeschwindigkeit soll bei ca. 0,2 m/s liegen.

#### 5.1.1 Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen

Innerhalb der deutschen Prüflaboratorien ist es gängige Praxis, dass die Brennzahl bei 20 °C und 100 °C ermittelt wird. Auf der Basis der Untersuchungen ist erkennbar, dass die bei 100 °C ermittelte Brennzahl häufig einen größeren Wert annimmt als bei 20 °C.

Über das Verhalten der Brennzahl bei von den atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken und Sauerstoffkonzentrationen stehen keine experimentellen Daten zur Verfügung.

Eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration führt vermutlich zu einem höheren Umsatz an flüchtigen Bestandteilen und daher zu einer Erhöhung der freigesetzten Reaktionswärme. Somit ist ein kritischeres Brennverhalten zu erwarten. Analog hierzu wird ein unkritischeres Brennverhalten erwartet, wenn die Sauerstoffkonzentration des Systems herabgesetzt wird.

Eine Erhöhung des Anfangsdrucks führt zu einer Erhöhung der Stoffmenge des Gases im System. Dem Reaktionssystem steht mehr Oxidationsmittel zur Verfügung. Gleichzeitig führt die Erhöhung der Stoffmenge zu einer Erhöhung der volumenspezifischen Wärmekapazität. Zusätzlich erschwert ein höherer Anfangsdruck die Ausgasung flüchtiger Bestandteile aus dem Staubkorn. Welcher dieser einzelnen Faktoren ausschlaggebend für das Verhalten der Brennzahl bei erhöhtem Druck ist, kann im Einzelnen zurzeit nicht abgeschätzt werden. Bei verminderten Anfangsdrücken ist zu vermuten, dass der Wert der Brennzahl sich nicht erhöht.

### 5.1.2 Empfehlung

Anhand der oben beschriebenen theoretischen Überlegungen lässt sich ein unkritischeres Brennverhalten für reduzierte Anfangsdrücke bzw. in sauerstoffreduzierten Atmosphären ableiten. Für eine konservative Auslegung von Schutzmaßnahmen wird jedoch empfohlen, die im Labor bei atmosphärischen Bedingungen bestimmte Brennzahl heranzuziehen. Für eine Erhöhung des Anfangsdrucks, der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration muss von einem kritischeren Brennverhalten ausgegangen werden. Die Brennzahl müsste allerdings unter diesen Bedingungen experimentell ermittelt werden. Da die experimentelle Bestimmung bei erhöhten Anfangsdrücken bzw. Temperaturen z. Z. nicht möglich ist, empfiehlt sich eine höhere Brennzahl von mindestens von 5 anzunehmen. Bei Erhöhung der Sauerstoffkonzentration sollte eine Brennzahl 6 abgeschätzt werden.

Tabelle 3: Verhalten der Brennzahl gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der Brennzahl	Gültige Abschätzung
Druck	$\leq 0,8$ bar abs.	nicht kritischer	-
	$\geq 1,1$ bar abs.	kritischer	5
Temperatur	$> 25$ °C	kritischer	5
Sauerstoffvolumenanteil	$< 21$ Vol.-%	konstant	-
	$> 21$ Vol.-%	kritischer	6

### 5.2 Glimmtemperatur

Die Glimmtemperatur oder auch Mindestzündtemperatur einer Staubschicht, beschreibt das Verhalten einer Staubschüttung gegenüber einer zweidimensionalen Wärmeeinwirkung. Eine zweidimensionale Wärmeeinwirkung resultiert aus der Übertragung eines Wärmestroms ausgehend von einer heißen Oberfläche in eine darauf abgelagerte Staubschüttung. Die Kenntnis der Glimmtemperatur erlaubt eine Abschätzung der maximal zulässigen Oberflächentemperaturen in staubexplosionsgefährdeten Bereichen.

Die Glimmtemperatur wird nach der DIN EN 50281-2-1 [5] ermittelt. Die Norm sieht vor, die Glimmtemperatur mit einer elektrisch geregelten Heizplatte zu bestimmen. Der zu untersuchende Staub wird mit einem Metallring ( $d = 100$  mm, 5 mm Schichtdicke) auf die vorgeheizte Heizplatte aufgetragen. Kommt es zur Entzündung der Staubschicht wird die Temperatur der Heizplatte reduziert und erneut Prüfstaub aufgegeben. Offensichtliches Merkmal der Entzündung ist ein Glimmen oder eine Flamme innerhalb der Staubschicht. Kann kein offensichtliches Glimmen beobachtet werden, so schreibt die Norm vor, dass ein Anstieg der Staubtemperatur  $> 450$  °C oder 250 K oberhalb der Heizplattentemperatur als Entzündung gewertet werden kann. Dieses Prozedere wiederholt sich, bis keine Entzündung innerhalb der Staubschicht mehr eintritt. Als Glimmtemperatur wird die kleinste,

auf das nächste ganzzahlige Vielfache von 10 K nach unten abgerundete Temperatur angegeben, bei der gerade noch eine Zündung eintritt.

### **5.2.1 Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen**

Über das Verhalten der Glimmtemperatur bei nicht-atmosphärischen Bedingungen wurden keine Untersuchungen publiziert. Es liegt einzig eine Messung der BAM [6] für die Glimmtemperatur von Kohle innerhalb einer sauerstoffreduzierten Atmosphäre vor. Diese zeigt, dass mit geringeren Sauerstoffkonzentrationen des Systems die Glimmtemperatur des Staubes zunimmt. Der Entzug des Oxidationsmittels äußert sich in einer Reduzierung der Wärmefreisetzungsrate. Diese Differenz muss durch eine höhere Temperatur der heißen Oberfläche kompensiert werden. Die Glimmtemperatur steigt an. Es ist zu vermuten, dass eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration dementsprechend zu einer niedrigeren Glimmtemperatur führt.

Analog zu den in Kapitel 5.1 beschriebenen Zusammenhängen ist der Druckeinfluss auf die Glimmtemperatur bei erhöhten Drücken zurzeit nicht einschätzbar. Für reduzierte Anfangsdrücke ist nicht mit einer Abnahme der Glimmtemperatur zu rechnen.

Eine Erhöhung der Umgebungstemperatur führt zu einer Reduzierung der aus der Staubschicht abgeführten Wärme. Es wird daher eine geringere Glimmtemperatur erwartet

### **5.2.2 Empfehlung**

Anhand der oben beschriebenen theoretischen Überlegungen lässt sich eine Zunahme der Glimmtemperatur in sauerstoffreduzierten Atmosphären ableiten. Für eine konservative Abschätzung wird jedoch empfohlen, dass die im Labor bei atmosphärischen Bedingungen bestimmte Glimmtemperatur für die Dimensionierung der maximalen Oberflächentemperatur in einem staubexplosionsgefährdeten Bereich herangezogen wird.

Für eine Erhöhung der Umgebungstemperatur oder der Sauerstoffkonzentration muss mit einer Abnahme der Glimmtemperatur gerechnet werden. Wie hoch die Reduzierung der Glimmtemperatur ist, kann zurzeit nicht beziffert werden.

Der Einfluss eines erhöhten Anfangsdrucks auf die Glimmtemperatur kann zurzeit nicht abgeschätzt werden. Bei vermindertem Ausgangsdruck ist jedoch nicht von einer Erniedrigung der Glimmtemperatur auszugehen.

## Kenngrößen abgelagerter Stäube – Glimmtemperatur & Selbstentzündungstemperatur

Tabelle 4: Verhalten der Glimmtemperatur gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der Glimmtemperatur	Gültige Abschätzung
<b>Druck</b>	$\leq 0,8$ bar abs.	keine Abnahme	z. Z. existieren keine gültigen Abschätzmethoden
	$\geq 1,1$ bar abs.	keine Erkenntnisse	
<b>Temperatur</b>	$> 25$ °C	Abnahme	
<b>Sauerstoffvolumenanteil</b>	$< 21$ Vol.-%	Zunahme	
	$> 21$ Vol.-%	Abnahme	

### 5.3 Selbstentzündungstemperatur

Schüttungen brennbarer Feststoffe können ohne offensichtliche Zündquelle, wie z. B. heiße Oberflächen oder Flammen, zur Entzündung gelangen. Bereits bei Raumtemperatur finden an der Oberfläche von brennbaren Staubpartikeln exotherme Reaktionen mit dem Luftsauerstoff statt. Diese Wärmefreisetzung bewirkt einen Temperaturanstieg in der Staubschüttung. Übersteigt die Rate der Wärmeproduktion die Rate der Wärmeverluste (im Wesentlichen beeinflusst durch die Temperaturdifferenz zwischen Staubschüttung und Umgebung, Wärmeleitfähigkeit und Größe der Schüttung) kann aus dieser Selbsterhitzung eine Selbstentzündung resultieren. Die Zeitspanne zwischen dem Erreichen der Lagerungstemperatur der Staubschüttung bis zur Entzündung wird als Induktionszeit bezeichnet.

Als Selbstentzündungstemperatur ist die maximale Lagertemperatur definiert, bei der eine Schüttung gerade nicht mehr zur Entzündung gelangt.

Die Kenntnis der Selbstentzündungstemperatur und der dazugehörigen Induktionszeit erlaubt unter anderem die Abschätzung sicherer Lagerbedingungen und die Auslegung von Trocknungsprozessen hinsichtlich maximaler Trocknungstemperaturen und Verweilzeiten.

Die Bestimmung der Selbstentzündungstemperatur eines Staubes erfolgt gemäß der DIN EN 15188 [7] mit isoperibolen Warmlagerungsversuchen. Dazu werden äquidistante Drahtnetzzyylinder oder Würfel mit dem zu prüfenden Staub in einem Prüfofen bei erhöhter Umgebungstemperatur gelagert. Eine Entzündung der Staubprobe wird anhand der folgenden Kriterien festgestellt:

- Die Temperaturdifferenz zwischen der Proben-temperatur und der Ofentemperatur überschreitet 60 K

oder

- Der Temperaturverlauf der Probenmitte weist einen Wendepunkt oberhalb der Ofentemperatur auf

Neben dem Verfahren der isoperibolen Warmlagerung existiert die Möglichkeit, die Selbstentzündungstemperatur nach dem Grewer Verfahren zu bestimmen. Eine Beschreibung dieses Verfahrens findet sich in der VDI Richtlinie 2263 Blatt 1 [1]. Im Grewer Ofen werden die Staubprobe und eine Referenzprobe aus Graphit in äquidistanten Drahtnetzzyylinder gelagert und mit einem kontinuierlichen Luftstrom überlagert. Der Grewer Ofen wird anschließend durch einen Temperaturgradienten von 1 K pro Minute aufgeheizt. Eine Entzündung wird in diesem Versuchsaufbau festgestellt, sobald eine exotherme Reaktion, also eine Temperaturdifferenz zwischen Staubprobe und Referenzprobe, registriert wird. Aus den so gewonnen Werten können keine Aussagen zuverlässiger Lagergroen oder –temperaturen getroffen werden. Dieser Test ist als Screeningtest anzusehen und dient in erster Linie dem Vergleich von Proben untereinander.

### 5.3.1 Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen

Für das Verhalten der Selbstentzündungstemperatur von Stuben bei nicht-atmosphärischen Bedingungen liegen ausschließlich Untersuchungen für abweichende Sauerstoffkonzentrationen vor. Abweichende Anfangsdrücke wurden bisher nicht untersucht.

Walther [8] untersuchte das Selbstentzundungsverhalten verschiedener organischer Stäube in einer sauerstoffreduzierten Umgebung mit dem Grewer Verfahren. Der Grewer Ofen wurde mit einem Temperaturgradienten von 1,4 K/min aufgeheizt und mit einem Volumenstrom von 120 l/h an Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch durchströmt. Zu den untersuchten Stuben zählten Erbsenmehl, Braun- und Fettkohle sowie ein nicht näher beschriebenes Polymer Pulver.

Walther führte mit jeder Staubprobe zwei verschiedene Versuchsreihen durch. In der ersten Versuchsreihe wurde die Staubprobe dem Grewer Ofen unbehandelt zugeführt. Hier besaß lediglich das zugeführte Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch einen reduzierten Sauerstoffvolumenanteil, die Staubprobe wurde nicht separat inertisiert. Es ist davon auszugehen, dass die Luft in den Hohlräumen der Staubschüttung einen Sauerstoffvolumenanteil von 21 Vol.-% besaß. In der zweiten Versuchsreihe besaßen sowohl die Staubprobe als auch das zugeführte Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch denselben Sauerstoffvolumenanteil. Für beide Versuchsreihen wurde der Sauerstoffvolumenanteil zwischen 5 Vol.-% und 21 Vol.-% variiert. Zusätzlich wurde in der zweiten Versuchsreihe der Sauerstoffvolumenanteil im System auf 0 Vol.-% reduziert.

In beiden Versuchsreihen beobachtete Walther, dass die Selbstentzündungstemperatur der Stäube konstant bleibt, wenn die Sauerstoffkonzentration reduziert wird (Abbildung 1). Es muss bei dieser Aussage beachtet werden, dass im Grewer Test das Auftreten einer ersten Exothermie bereits als Selbstentzündung gewertet wird.

## Kenngrößen abgelagerter Stäube - Selbstentzündungstemperatur

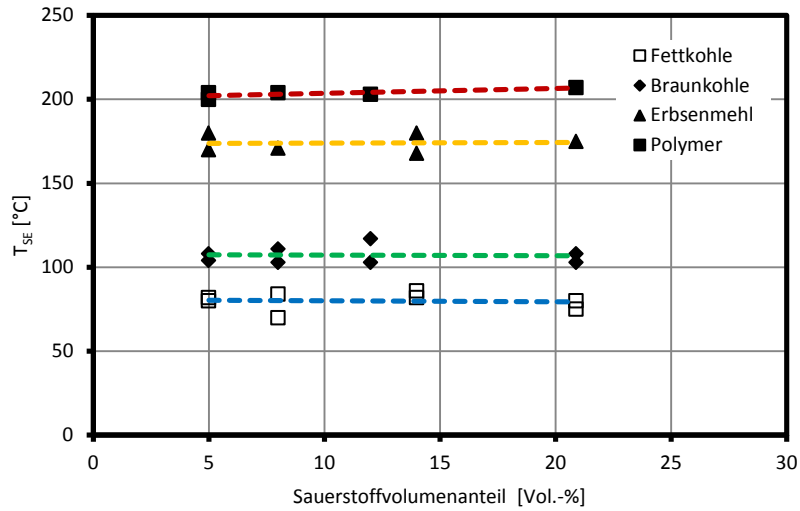


Abbildung 1: Versuchsergebnisse von Walther [8]

Wie Abbildung 2 zeigt, sinkt die maximale Temperaturdifferenz zwischen der Probe und dem Ofen bei sinkenden Sauerstoffvolumenanteilen.

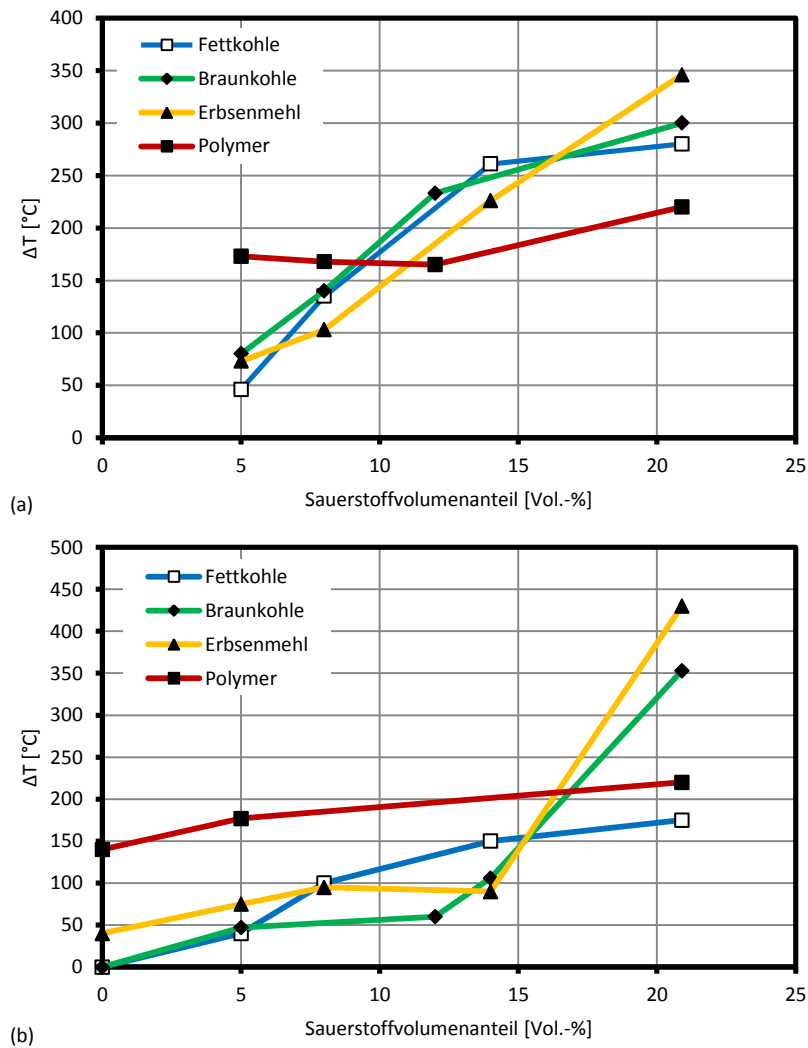


Abbildung 2: Maximale Temperaturdifferenz zwischen Proben- und Greuer-Ofentemperatur in den Untersuchungen von Walther [8]. (a) unterschiedliche Sauerstoffkonzentration in Staub und Umgebung, (b) identische Sauerstoffkonzentration in Staub und Umgebung ( $V = 8 \text{ cm}^3$ )

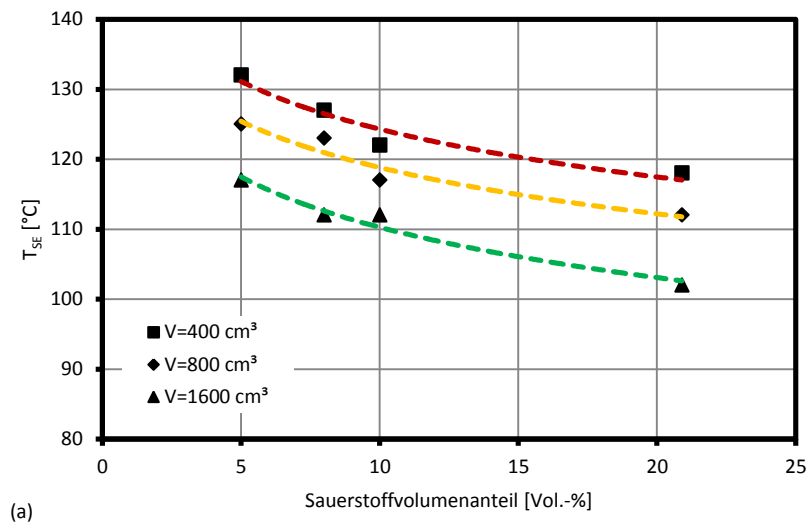


## Kenngrößen abgelagerter Stäube - Selbstentzündungstemperatur

Die Abnahme der maximalen Temperaturdifferenz zeigt, dass bei Reduzierung der Sauerstoffkonzentration weniger Energie durch die exotherme Reaktion freigesetzt wird. Erst für Sauerstoffvolumenanteile von 0 Vol.-% kann für einige Stäube, hier Braun- und Fettkohle, keine Temperaturdifferenz mehr registriert werden. Dies gilt jedoch nur für Stäube, welche ausschließlich durch Luftsauerstoff oxidiert werden. Stäube, die ohne die externe Zufuhr von Sauerstoff einer exothermen Zersetzung unterliegen, hier Erbsenmehl und Polymer, weisen selbst für einen eingestellten Sauerstoffvolumenanteil von 0 Vol.-% eine exotherme Reaktion auf.

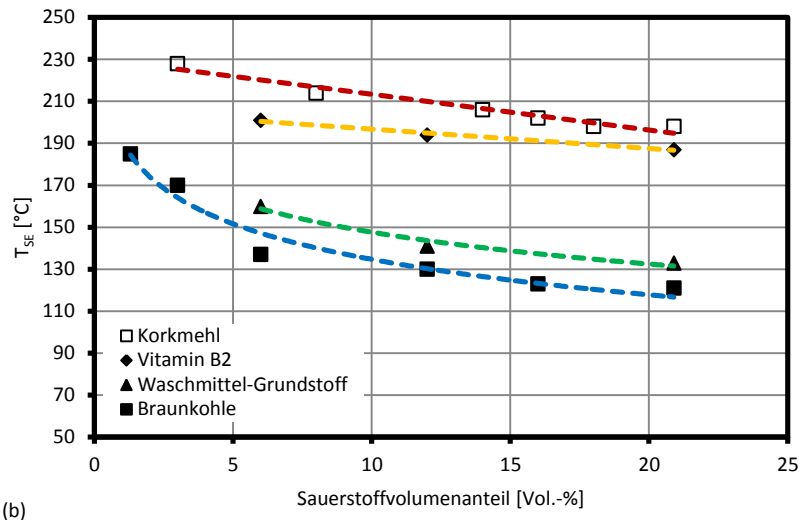
Wiemann und Scholl [9] untersuchten mit isoperibolen Warmlagerungsversuchen das Verhalten der Selbstentzündungstemperatur von Braunkohle mit einem Medianwert von ca. 100  $\mu\text{m}$  in einem System mit sauerstoffreduzierter Atmosphäre. Die Sauerstoffvolumenanteile des eingesetzten Sauerstoff/Stickstoff-Gemisches wurden in diesen Versuchen in einem Bereich von 5 Vol.-% bis 21 Vol.-% variiert. Der Volumenstrom des Sauerstoff/Stickstoff-Gemisches betrug 240 l/h. Die Probenvolumen lagen bei 400  $\text{cm}^3$ , 800  $\text{cm}^3$  und 1600  $\text{cm}^3$ . Die Ergebnisse von Wiemann und Scholl sind in Abbildung 3(a) dargestellt.

Weitere Warmlagerversuche wurden von Schmidt et al. [10, 11, 12] sowie Lohrer [13, 14] durchgeführt. Diese untersuchten die Selbstentzündungstemperatur von Braun- und Steinkohle, Korkmehl, Vitamin B2-Pulver sowie einem Waschmittelgrundstoff. In den Versuchen wurde der Sauerstoffvolumenanteil auf Werte  $< 3$  Vol.-% reduziert. Die Ergebnisse dieser Autoren sind in Abbildung 3(b) dargestellt.



(a)

## Kenngrößen abgelagerter Stäube - Selbstentzündungstemperatur



(b) **Abbildung 3:** Versuchsergebnisse bei isothermer Warmlagerung von Wiemann und Scholl (a) sowie von Lohrer und Schmidt ( $V = 100 \text{ cm}^3$ ) (b)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Selbstentzündungstemperatur eines Staubes bei isoperiboler Warmlagerung unter sauerstoffreduzierter Atmosphäre ansteigt. Analog zu den Versuchsergebnissen von Walther sinkt bei der isoperibolen Warmlagerung die Temperaturdifferenz zwischen Proben- und Umgebungstemperatur.

Für die Untersuchungen von Schmidt und Lohrer ist bekannt, dass bei sehr geringen Sauerstoffkonzentrationen die Kriterien zur Bewertung einer Selbstentzündung gemäß der Norm nicht herangezogen werden konnten. In diesen Versuchen wurden Verfärbungen, Massenverlust oder das Auftreten eines Temperaturplateaus oberhalb der Ofentemperatur als Selbstentzündung gewertet.

Anzumerken ist noch, dass in den aufgeführten Untersuchungen die Induktionszeiten der Stäube konstant bleiben.

Die oben aufgeführten Ergebnisse scheinen auf den ersten Blick widersprüchlich. Während Walther eine konstante Selbstentzündungstemperatur beobachtete, stieg diese bei Lohrer und Schmidt sowie Wiemann und Scholl an. Dies lässt sich auf die verschiedenen Zündkriterien in den unterschiedlichen Prüfverfahren zurückführen. Im Grewer Test wird das erste Auftreten der exothermen Reaktion in der Schüttung als Entzündung gewertet. Es spielt keine Rolle, wie hoch diese Exothermie ausfällt. Damit die exotherme Reaktion startet, ist es erforderlich, dass dem System die für den Beginn der exothermen Reaktion notwendige Aktivierungsenergie zugeführt wird. Diese ist unabhängig von den Konzentrationen der beteiligten Reaktionskomponenten und bleibt daher bei einer Reduzierung der Sauerstoffkonzentration im System konstant.

Da im Grewer Test der Prüfofen durch einen konstanten Temperaturgradienten aufgeheizt wird, wird dem System ein stetiger Wärmestrom zugeführt. Die notwendige Aktivierungsenergie der Reaktion wird jeweils bei identischen Ofentemperaturen aufgebracht. Als Folge dessen startet die Reaktion

## Kenngrößen abgelagerter Stäube - Selbstzündungstemperatur

innerhalb der sauerstoffreduzierten Atmosphäre bei der gleichen Ofentemperatur wie die Reaktion unter atmosphärischen Bedingungen. Die Selbstzündungstemperatur des Staubes bleibt konstant.

Demgegenüber muss bei der isoperibolen Warmlagerung für eine Selbstzündung eines der zuvor genannten Kriterien erfüllt sein. Da die Sauerstoffkonzentration sinkt, wird weniger Reaktionswärme freigesetzt. Im Vergleich zu atmosphärischen Bedingungen heizt sich die Staubschüttung nicht mehr so stark auf. Die Kriterien der isoperibolen Warmlagerung für eine Entzündung werden nicht mehr erfüllt. Um die verringerte Wärmefreisetzung zu kompensieren und ein ausreichendes Aufheizen der Staubprobe zu gewährleisten, muss die Wärmeabfuhr reduziert werden. Dies wird durch die Erhöhung der Umgebungstemperatur erreicht. Die Umgebungstemperatur, für welche eine Selbstzündung nach Norm festgestellt werden kann steigt dementsprechend bei Reduzierung der Sauerstoffkonzentration an.

Der Einfluss einer erhöhten Sauerstoffkonzentration auf die Selbstzündungstemperatur bei der isoperibolen Warmlagerung wurde von Schmidt [6] untersucht. Hierzu wurde die Selbstzündungstemperatur von gepressten organischen Fasern in Umgebungen mit Sauerstoffvolumenanteilen bis zu 100 Vol.-% bestimmt. Die ermittelten Selbstzündungstemperaturen zeigen, dass für steigende Sauerstoffkonzentrationen mit einer deutlich reduzierten Selbstzündungstemperatur zu rechnen ist.

Über das Verhalten der Selbstzündungstemperatur bei von den atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken stehen keine experimentellen Daten zur Verfügung. Analog zu den in Kapitel 5.1 beschriebenen Zusammenhängen ist der Druckeinfluss auf die Selbstzündungstemperatur bei erhöhten Drücken zurzeit nicht einschätzbar. Bei niedrigeren Ausgangsdrücken ist nicht davon auszugehen, dass es zu einer Abnahme der Selbstzündungstemperatur kommt.

### 5.3.2 Empfehlung

Aufgrund fehlender Abschätzformeln kann das Verhalten der Selbstzündungstemperatur bei nicht-atmosphärischen Bedingungen nur qualitativ beschrieben werden. Zudem zeigen die oben aufgeführten Ergebnisse, dass das Verhalten der Selbstzündungstemperatur im Zusammenhang mit der gewählten Bestimmungsmethode betrachtet werden muss. Welche Bestimmungsmethode verwendet werden sollte, hängt von den in der Praxis vorliegenden Randbedingungen ab. In der Regel können diese mit der isoperibolen Warmlagerung besser abgebildet werden. Im Gegensatz zu Screeningtests erlaubt die isoperibole Warmlagerung eine Extrapolation der Laborergebnisse auf in der Praxis relevante Schüttungsgrößen.

Für sauerstoffreduzierte Systeme kann aufgrund obiger Erkenntnisse davon ausgegangen werden, dass die Selbstzündungstemperatur in geringem Umfang ansteigt. Für eine konservative Abschätzung wird empfohlen die im Labor unter atmosphärischen Bedingungen ermittelte Selbstzündungstemperatur heranzuziehen. Es ist zu beachten, dass auch bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen mit

## Kenngrößen abgelagerter Stäube - Selbstentzündungstemperatur

einer Selbsterwärmung der Staubschüttung zu rechnen ist. Es sollte durch ergänzende Untersuchungen ausgeschlossen werden, dass es sich um einen nicht-oxidativen Prozess handelt.

Für erhohnte Sauerstoffkonzentrationen ist mit einer deutlichen Abnahme der Selbstentzündungstemperatur zu rechnen. Daher wird empfohlen, die Selbstentzündungstemperatur bei erhohnten Sauerstoffkonzentrationen im Labor zu bestimmen.

Der Einfluss von erhohstem Druck auf die Selbstentzündungstemperatur kann zurzeit nicht abgeschätzt werden. Bei vermindertem Ausgangsdruck ist jedoch nicht von einer Erniedrigung der Selbstentzündungstemperatur auszugehen.

Anmerkung: Es wird darauf hingewiesen, dass durch plötzlichen Sauerstoffeintrag in ein inertisiertes System Schüttungen entzündet werden können, vor allem wenn diese auf ein erhohstes Temperaturniveau gebracht worden sind (z. B. nach einem Trocknungsprozess). Ebenso muss dies beim Austrag vom Produkt aus einem inertisierten System und ggf. anschließender Lagerung mit erhöhter Anfangstemperatur berücksichtigt werden.

**Tabelle 5: Verhalten der Selbstentzündungstemperatur gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden**

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der Selbstentzündungstemperatur	Gültige Abschätzung
<b>Druck</b>	$\leq 0,8$ bar abs.	keine Abnahme	z. Z. existieren keine gültigen Abschätzmethoden
	$\geq 1,1$ bar abs.	keine Erkenntnisse	
<b>Sauerstoffvolumenanteil</b>	$< 21$ Vol.-%	Zunahme	
	$> 21$ Vol.-%	Abnahme	

## **6 Kenngrößen aufgewirbelter Staub/Luft-Gemische**

### **6.1 Zündtemperatur aufgewirbelter Staub/Luft-Gemische**

Mit der Zündtemperatur eines aufgewirbelten Staub/Luft-Gemisches wird die minimale Temperatur einer heißen Oberfläche bezeichnet, welche in der Lage ist bei Kontakt mit einem aufgewirbelten Staub diesen zu entzünden. Analog zu der Glimmtemperatur erlaubt die Kenntnis der Zündtemperatur die Festlegung der maximal zulässigen Oberflächentemperatur der in einem staubexplosionsgefährdeten Bereich eingesetzten Anlagenteile und Geräte. Die Bestimmung der Zündtemperatur im Labor erfolgt entweder gemäß der DIN EN 50281-2-1 [5], im Godbert-Greenwald Ofen oder im BAM Ofen.

Der Godbert-Greenwald Ofen besteht im Wesentlichen aus einem senkrecht montierten aufheizbaren Zylinder mit einem vorgeschalteten Staubvorratsbehälter. Der zu untersuchende Staub wird mittels Druckstoß aus der Vorlage in das aufgeheizte Ofenrohr eingeblasen. Als Entzündung ist eine aus dem Rohr austretende Flamme definiert. Funken ohne Flamme werden nicht als Entzündung gewertet. Kommt es nach dem Einblasen zu einer Entzündung des Staubes, wird die Ofentemperatur reduziert und erneut Staub eingeblasen. Dieser Vorgang wiederholt sich bis keine Entzündung mehr festgestellt wird. Als Zündtemperatur gilt die niedrigste Ofentemperatur, für welche gerade noch eine Entzündung des eingeblasenen Staubes eintritt.

Der BAM Ofen besteht aus einem waagrecht montierten aufheizbaren Zylinder. Der zu untersuchende Staub wird in eine stirnseitig verbaute Staubvorlage gefüllt. Durch die Betätigung eines Handbalgs wird der Staub in die Prüfkammer eingeblasen. In der Prüfkammer trifft der eingeblasene Staub auf eine senkrecht stehende, kalottenförmige und temperaturüberwachte Prallfläche. Als Entzündung ist eine Flamm- bzw. Knallerscheinung definiert. Kommt es nach dem Einblasen zu einer Entzündung wird der Versuch bei einer um 10 K reduzierten Ofentemperatur durchgeführt. Als Zündtemperatur gilt die niedrigste Ofentemperatur, für welche gerade noch eine Entzündung des eingeblasenen Staubes eintritt.

#### **6.1.1 Untersuchungen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen**

Für das Verhalten der Zündtemperatur bei nicht-atmosphärischen Bedingungen liegt lediglich eine Messreihe von Schmidt [6] vor. Dieser untersuchte das Verhalten der Zündtemperatur einer Kohle innerhalb einer sauerstoffreduzierten Atmosphäre. Dazu wurde der Godbert-Greenwald Ofen in eine Glovebox eingebracht und mit einem Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch der gewünschten Sauerstoffkonzentrationen gespült. Der Staub wurde mit einem Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch identischer Zusammensetzung in den Ofen eingeblasen. Die ermittelten Zündtemperaturen zeigen eine tendenzielle Zunahme der Zündtemperatur bei abnehmender Sauerstoffkonzentration. Für

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Zündtemperatur & Mindestzündenergie

Sauerstoffvolumenanteile < 10 Vol.-% wurde nur noch die Ausbildung von Funken beobachtet. Aufgrund der geringeren pro Volumeneinheit zur Verfügung stehenden Stoffmenge an Sauerstoff ist im Unterdruckbereich ebenfalls mit einer Zunahme der Zündtemperatur zu rechnen.

Über das Verhalten der Zündtemperatur bei von den atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken stehen keine experimentellen Daten zur Verfügung. Analog zu den in Kapitel 5.1 beschriebenen Zusammenhängen ist der Druckeinfluss auf die Zündtemperatur bei erhöhten Drücken zurzeit nicht einschätzbar. Bei reduzierten Ausgangsdrücken ist nicht davon auszugehen, dass es zu einer Abnahme der Zündtemperatur kommt.

### 6.1.2 Empfehlung

Anhand der oben aufgeführten Erkenntnisse lässt sich eine Zunahme der Zündtemperatur in sauerstoffreduzierten Atmosphären ableiten. Da bei An- und Abfahrvorgängen unter Umständen atmosphärische Bedingungen vorliegen können wird empfohlen, dass die im Labor bei atmosphärischen Bedingungen bestimmte Zündtemperatur für die Festlegung der maximalen Oberflächentemperatur herangezogen wird.

Bei einer Erhöhung der Sauerstoffkonzentration muss mit einer Abnahme der Zündtemperatur gerechnet werden. Die Höhe der Reduzierung kann zurzeit nicht beziffert werden.

Der Einfluss von erhöhtem Druck auf die Zündtemperatur kann zurzeit nicht abgeschätzt werden. Bei vermindertem Ausgangsdruck ist jedoch nicht von einer Erniedrigung der Zündtemperatur auszugehen.

**Tabelle 6: Verhalten der Zündtemperatur gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden**

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der Zündtemperatur	Gültige Abschätzung
<b>Druck</b>	$\leq 0,8$ bar abs.	keine Abnahme	z. Z. existieren keine gültigen Abschätzmethoden
	$\geq 1,1$ bar abs.	keine Erkenntnisse	
<b>Temperatur</b>	$> 25$ °C	keine Erkenntnisse	
<b>Sauerstoffvolumenanteil</b>	$< 21$ Vol.-%	Zunahme	
	$> 21$ Vol.-%	Abnahme	

## 6.2 Mindestzündenergie

Mit der Mindestzündenergie wird die Zündwilligkeit eines Staub/Luft-Gemisches gegenüber elektrischen Kondensatorentladungen charakterisiert. Die Bestimmung der Mindest-

zündenergie im Labor erfolgt gemäß der DIN EN 13821 [15]. Diese schreibt die Bestimmung der Mindestzündenergie in einer Hartmann-Apparatur vor. Die Hartmann-Apparatur besteht im Wesentlichen aus einem senkrecht montierten Quarzglasrohr. Der zu untersuchende Staub wird am unteren Ende des Rohres in einer Staubvorlage deponiert und mit einem Druckstoß aufgewirbelt. Als Zündquelle wird die Entladung eines Kondensators über ein Zwei- bzw. Dreielektrodensystem genutzt. Kommt es zu einer Entzündung wird die Zündenergie anschließend solange reduziert, bis bei der gewählten Staubkonzentration keine Entzündung mehr eintritt. Als Entzündung wird eine selbstständige Flammenausbreitung ausgehend von der Position der Funkenentladung gewertet. Anschließend wird die Staubkonzentration variiert. Kommt es mit der zuvor ermittelten Zündenergie zu einer Entzündung, wird die Zündenergie erneut reduziert bis keine Entzündung mehr festgestellt werden kann. Nach Ermittlung der zündfreudigsten Staubkonzentration wird die Zündverzögerungszeit variiert, bis der geringste Wert der Zündenergie ermittelt wurde.

### **6.2.1 Abhängigkeit der Mindestzündenergie von der Sauerstoffkonzentration**

Glärner [16] untersuchte das Verhalten der Mindestzündenergie in sauerstoffreduzierten Atmosphären. Die Untersuchungen wurden in einer 20 l-Laborapparatur durchgeführt. Für Zündenergien  $\leq 100$  J nutzte Glärner eine Dreifachfunkenstrecke mit einer Induktivität von  $L = 1,32$  mH im Entladekreis, Energiewerte  $> 100$  J wurden mit pyrotechnischen Zündern erreicht. Die Zündverzögerungszeit betrug 120 ms.

Untersucht wurde Lycopodium, Erbsenmehl und Melamin mit Korndurchmessern  $< 63$   $\mu\text{m}$  in Sauerstoffbereichen von 10 Vol.-% bis zu 30 Vol.-%. Abbildung 4 zeigt die von Glärner ermittelten Versuchsergebnisse. Die Mindestzündenergie der untersuchten Stäube steigt bei Sauerstoffvolumenanteilen  $< 21$  Vol.-% an. Im Bereich der Sauerstoffvolumenanteile  $> 21$  Vol.-% ist jeweils nur ein Messpunkt vorhanden. Dieser zeigt, dass die ermittelten Mindestzündenergien geringer sind als unter atmosphärischen Bedingungen bestimmt.

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Mindestzündenergie

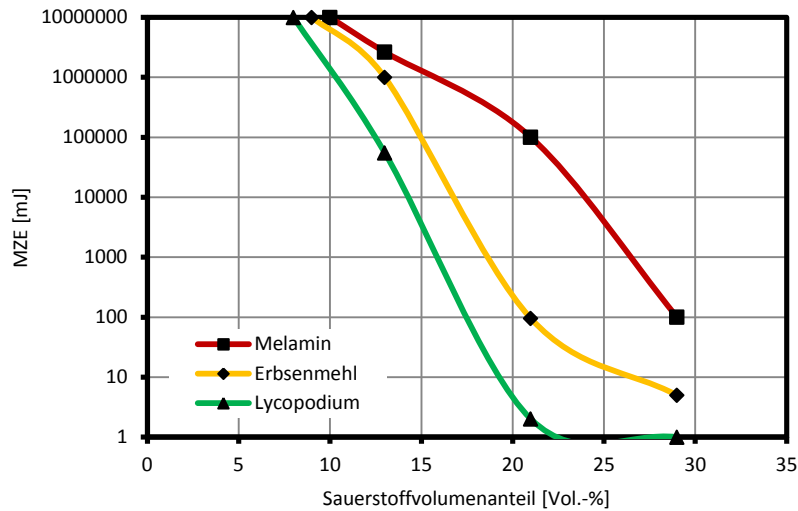


Abbildung 4: Versuchsergebnisse von Glarner [16] über das Verhalten der Mindestzündenergie unter sauerstoffreduzierten Atmosphären.

Weitere Untersuchungen zum Verhalten der Mindestzündenergie unter sauerstoffreduzierten Atmosphären wurden von Glor und Schwenzfeuer [17] publiziert. Diese untersuchten 22 verschiedene Stäube in einem MIKE 3<sup>2</sup>. Zu den untersuchten Stäuben zählten sieben verschiedene Antioxidantien, sieben verschiedene Farbpigmente, Vestowax<sup>3</sup>, HE-HTMP<sup>4</sup>, Anthrachinon, Meritena, Lycopodium, Erbsenmehl, Netzschwefel und Feinkohle. Der Medianwert der verwendeten Produkte reichte von 19 µm bis 45 µm.

In den Versuchen wurde der Sauerstoffvolumenanteil zwischen 12 Vol.-% und 28 Vol.-% variiert. Glor und Schwenzfeuer beobachteten, dass die Mindestzündenergie im Bereich von Sauerstoffvolumenanteilen < 21 Vol.-% exponentiell ansteigt.

$$MZE = MZE_{Fakt} \cdot \exp\left\{23,2 - \frac{23,2}{21} \cdot y_{O_2}\right\} \quad (1)$$

MZE beschreibt die Zündenergie des Staubs in mJ in Abhängigkeit des Sauerstoffvolumenanteils. Mit  $y_{O_2}$  wird der Sauerstoffvolumenanteil in der Atmosphäre ( $O_2 + N_2$ ) in Vol.-% bezeichnet.  $MZE_{Fakt}$  bezeichnet einen stoffspezifischen Faktor in mJ, der die unterschiedliche Mindestzündenergie der Stäube bei atmosphärischen Bedingungen berücksichtigt. Dieser Faktor entspricht für technische Stäube der Mindestzündenergie bei 21 Vol.-%, sofern diese Mindestzündenergie größer 1 mJ ist. Für Stäube mit einer Mindestzündenergie < 1 mJ und für Naturprodukte sind zwei Mindestzündenergien bei reduzierten

<sup>2</sup> Mindestzündenergie-Apparatur der Firma Kuhner; bestehend aus zwei sich aufeinander zu bewegenden Elektroden. Das Vorgängermodell besaß eine Dreielektrodenfunkenstrecke

<sup>3</sup> Synthetisches Wachs für die Veredlung verschiedener Kunststoffe

<sup>4</sup> 1-(2-Hydroxyethyl)-2,2,6,6-tetramethyl-4-hydroxy-piperidin; Additiv für Kunststoffe



## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Mindestzündenergie

Sauerstoffkonzentrationen im Labor zu ermitteln. Der Faktor ist anschließend durch Anpassen des sich aus Gleichung (1) ergebenden Graphen an die Messwerte zu ermitteln.

Abbildung 5 zeigt die nach Gleichung (1) berechneten Mindestzündenergien nach dem von Glor und Schwenzfeuer vorgeschlagenen Schema. Für die Berechnung wurden die von Glor und Schwenzfeuer ermittelten Mindestzündenergien von zwei Pigmenten herangezogen. Die Mindestzündenergie bei atmosphärischen Bedingungen war  $> 1$  mJ.

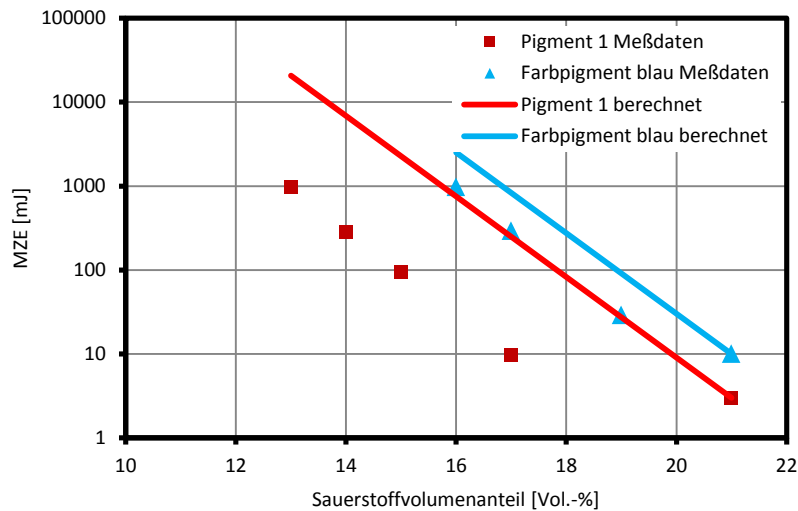


Abbildung 5: Berechnung der Mindestzündenergie nach Gleichung (1) für technische Stäube mit Mindestzündenergien bei atmosphärischen Bedingungen von  $> 1$  mJ. Daten entnommen aus [17]

Für Sauerstoffvolumenanteile  $> 21$  Vol.-% zeigen die aufgeführten Autoren, dass die in diesem Bereich ermittelte Mindestzündenergie unterhalb der bei atmosphärischen Bedingungen ermittelten Mindestzündenergie liegen. Konkrete Abschätzformeln sind für diese Bedingungen nicht vorhanden.

### 6.2.2 Empfehlung zur Sauerstoffabhängigkeit der Mindestzündenergie

Für die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration kann bei organischen Stuben von einer Zunahme der Mindestzündenergie ausgegangen werden. Eine Berechnung dieser Mindestzündenergie für Sauerstoffvolumenanteile  $< 21$  Vol.-% ist mit Gleichung (1) grundsätzlich möglich. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der teilweise hohen Abweichungen die Berechnungsmethoden nur eine Abschätzung der Größenordnung erlauben und damit nicht für Grenzfälle im Hinblick auf die Gefährdungsbeurteilung herangezogen werden dürfen. Zudem gilt es zu prüfen, in wie weit die Gleichung auf andere als die von Glor und Schwenzfeuer untersuchten Stäube angewendet werden kann.

Bei Erhöhung der Sauerstoffkonzentration ist davon auszugehen, dass die Mindestzündenergie von organischen Stäuben abnimmt. Eine Vorhersage der reduzierten Mindestzündenergien ist zurzeit nicht möglich.

### 6.2.3 Abhängigkeit der Mindestzündenergie von der Umgebungstemperatur

Glärner [16, 18] untersuchte den Einfluss der Temperatur auf die Mindestzündenergie. Hierfür verwendete Glärner den in 6.2.1 beschriebenen Versuchsaufbau (inkl. Induktivität  $L = 1,32 \text{ mH}$ ). Dieser wurde auf Temperaturen zwischen  $20 \text{ °C}$  und  $200 \text{ °C}$  aufgeheizt. Untersucht wurden von Glärner Lycopodium, Cellulose, Herbizid, Maisstärke, Erbsenmehl, Melamin sowie zwei Klärschlämme und zwei Farbstoffe mit Korngrößen  $< 63 \text{ }\mu\text{m}$ . Diese wurden vor Versuchsbeginn in einem Trockenschrank auf die jeweilige Versuchstemperatur aufgeheizt. Anschließend wurde der Staub in den vorgeheizten Vorlagebehälter eingebracht. Glärner beobachtete bei allen Stäuben eine Abnahme der Mindestzündenergie für steigende Umgebungstemperaturen. Abbildung 6 zeigt einige Versuchsergebnisse von Glärner.

Weitere Untersuchungen von Radandt [19] und Drechsler [20] an Weizenmehl, Maisstärke und Maltodextrin mit Korndurchmessern  $< 63 \text{ }\mu\text{m}$  zeigen ebenfalls eine tendenzielle Abnahme der Mindestzündenergie bei erhöhten Umgebungstemperaturen. Diese Versuche wurden in einer Hartmann-Apparatur durchgeführt, welche in einer Klimakammer montiert wurde. Untersucht wurde von Radandt und Drechsler ein Temperaturbereich von  $5 \text{ °C}$  bis  $50 \text{ °C}$ .

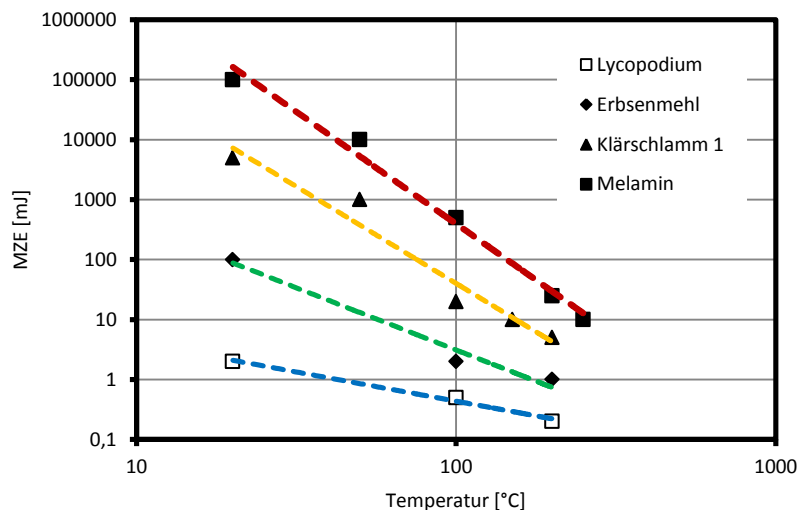


Abbildung 6: Ausgewählte Versuchsergebnisse von Glärner [16, 18] über das Verhalten der Mindestzündenergie bei erhöhten Umgebungstemperaturen.

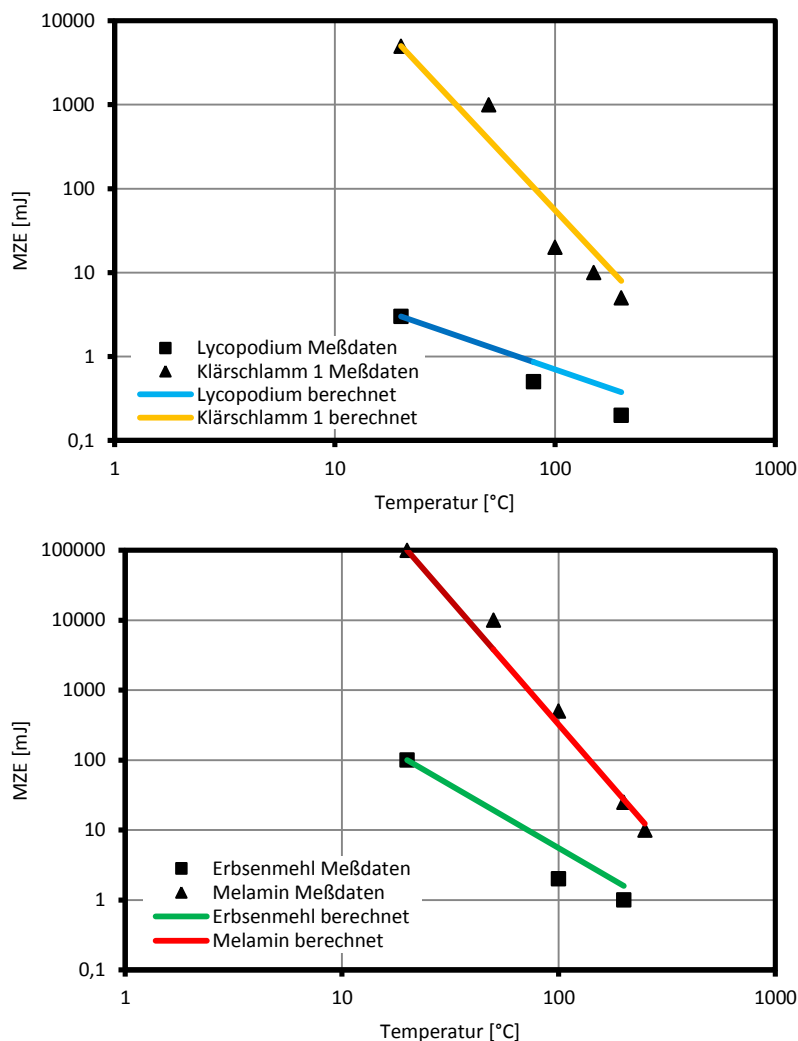
Durch doppellogarithmische Auftragung wie in Abbildung 6 kann die Abnahme der Mindestzündenergie bei steigenden Temperaturen als lineare Gleichung wiedergegeben werden. Glärner zeigte mittels linearer Regression, dass die Stäube bei einer Temperatur von

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Mindestzündenergie

1000 °C eine identische Mindestzündenergie von 0,088 mJ zu haben scheinen. Durch die Kenntnis der Mindestzündenergie eines Staubes bei Standardbedingungen kann nun die Mindestzündenergie für Temperaturen bis 200 °C berechnet werden, indem zwischen den beiden bekannten Punkten linear interpoliert wird. Aus den Daten von Glarner wurde folgende Gleichung (2) abgeleitet:

$$\log(MZE) = \log(0,088) + \frac{\log\left(\frac{MZE_0}{0,088}\right)}{\log\left(\frac{T_0}{1000}\right)} \cdot \log\left(\frac{T}{1000}\right) \quad (2)$$

Hier wird mit MZE die Mindestzündenergie in mJ und die Temperatur T in °C angegeben. Der Index 0 bezieht sich auf ein bekanntes Wertepaar von MZE und T. Ein Vergleich von berechneten Mindestzündenergien nach Gleichung (2) und von Glarner experimentell ermittelten Mindestzündenergien ist in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7:** Vergleich von mit Gleichung (2) berechneten Mindestzündenergien mit von Glarner experimentell ermittelten Daten entnommen aus [16]

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Mindestzündenergie

Bartknecht und Siwek [21] liefern, basierend auf den Daten von Glarner, Gleichung (3):

$$MZE(T) = a \cdot MZE(20^\circ\text{C})^b \quad (3)$$

Für die Koeffizienten a und b gelten die Gleichungen (4) bis (6):

$$a = 6,4309 \cdot T^{-0,6213} \quad \text{Für } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$b = 1,1955 \cdot \exp\{-0,008927 \cdot T\} \quad \text{Für } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 70^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$b = 0,796 \cdot \exp\{-0,003117 \cdot T\} \quad \text{Für } 70^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C} \quad (6)$$

Abbildung 8 zeigt den Vergleich von mit Gleichung (3) berechneten Mindestzündenergien mit den von Glarner experimentell ermittelten Mindestzündenergien. Analog zu Gleichung (2) gelten die obigen Abschätzgleichungen in einem Temperaturbereich bis 200 °C.

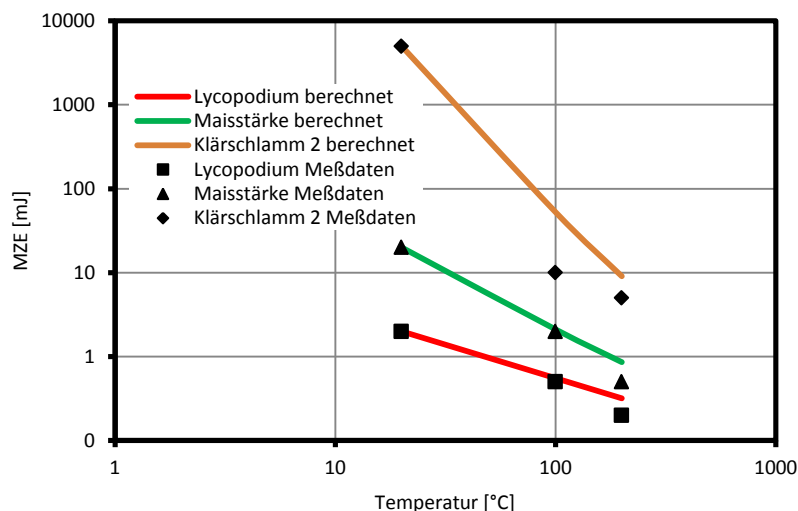


Abbildung 8: Vergleich von berechneten Werten nach der Methode von Bartknecht und Siwek mit von Glarner [16] ermittelten Mindestzündenergien

### 6.2.4 Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit der Mindestzündenergie

Die vorliegenden Veröffentlichungen zeigen, dass mit einer tendenziellen Abnahme der Mindestzündenergie für steigende Umgebungstemperaturen zu rechnen ist. Aus der Schnittpunktsbedingung (bei 1000 °C besitzen alle Stäube eine Mindestzündenergie von 0,088 mJ) von Glarner resultiert, dass wenig und normal entzündliche Stäube stärker von der Temperatur abhängen als besonders und extrem entzündliche Stäube. Die Reduzierung der Mindestzündenergie eines normal entzündlichen Staubes auf das Niveau eines besonders zündempfindlichen Staubes ist möglich.

Mit der linearen Interpolation, Gleichung (2), und der von Bartknecht und Siwek vorgeschlagenen Berechnung, Gleichung (3), ist eine qualitative Abschätzung der Mindestzündenergie bei erhöhten Umgebungstemperaturen bis 200 °C möglich. Hierbei wird aufgrund der teilweisen hohen Abweichungen der berechneten zu den experimentellen Werten empfohlen, die Abschätzung nur für eine Erstbewertung heranzuziehen. Insbesondere bei Werten, die in der Gefährdungsbeurteilung herangezogen werden, ist eine experimentelle Untersuchung des Staubes erforderlich.

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Abschätzformeln auf Untersuchungen in der 20 l-Laborapparatur basieren und eine Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse nach aktueller Norm (DIN EN 13821) aussteht.

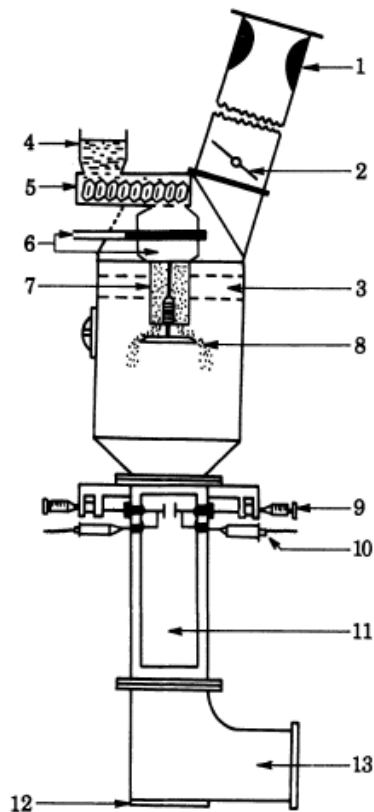
Anmerkung: Es wird darauf hingewiesen, dass nach derzeitigem Kenntnisstand Büschelentladungen für aufgewirbelte Stäube bei atmosphärischen Bedingungen als nicht zündwirksam gelten. Zum jetzigen Zeitpunkt kann nicht ausgeschlossen werden, dass Büschelentladungen bei erhöhten Temperaturen zündwirksam werden können. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass aufgewirbelter Staub in Systemen mit Sauerstoffvolumenanteilen > 21 Vol.-% bereits durch Büschelentladungen entzündet werden können [22].

### **6.2.5 Abhängigkeit der Mindestzündenergie vom Anfangsdruck**

Für die Abhängigkeit der Mindestzündenergie vom Anfangsdruck des Systems liegen verschiedene Publikationen vor. Glarner [16] untersuchte in der in 6.2.1 beschriebenen Versuchsanordnung das Verhalten der Mindestzündenergie von Lycopodium, Erbsenmehl und Melamin-Pulver mit Korngrößen < 63 µm. Die Anfangsdrücke des Systems wurden zwischen 0,65 bar abs. und 1,6 bar abs. bei der unter atmosphärischen Bedingungen zündfreudigsten Staubkonzentration variiert. In diesen Versuchen beobachtete Glarner einen Anstieg der Mindestzündenergie bei Reduzierung des Anfangsdrucks. Für eine Erhöhung des Anfangsdrucks blieb die Mindestzündenergie konstant.

Franke [23] veröffentlichte Untersuchungen an Gasflam- (17 µm Medianwert) und Fettkohle (18 µm Medianwert). Die Versuche wurden bei einer konstanten Staubkonzentration von 500 g/m<sup>3</sup> in einer 44 l-Laborapparatur mit Dreifachfunkenstrecke durchgeführt. Die Anfangsdrücke des Systems lagen in einem Bereich von 1,013 bar abs. bis 1,276 bar abs. In diesem Versuchsaufbau beobachtete Franke einen Anstieg der Mindestzündenergie für steigende Anfangsdrücke.

Ballal [24] untersuchte das Verhalten der Mindestzündenergie sowohl von Kohlenstoffstaub als auch von Magnesium und Aluminium im Unterdruckbereich. Hierfür nutzte Ballal eine eigens entwickelte Versuchskammer. Hiervon zeigt Abbildung 9 eine schematische Darstellung. Der Anfangsdruck in der Versuchskammer wurde zwischen 0,2 bar abs. und 1 bar abs. variiert. Ballal beobachtete, dass die Mindestzündenergie der untersuchten Stäube im Unterdruckbereich ansteigt.



1. Trichterförmiger Lufteinlass mit Venturi Volumenstrommesser
2. Ventil zur Regulierung des Massendurchsatzes
3. Strömungsrichter
4. Staubvorlage
5. Schneckenförderer
6. Wirbelkammer
7. Konzentrischer Stahl Zylinder
8. Drehscheibe, angetrieben mit einem Elektromotor
9. Funkenstrecke
10. Hochspannungssonde
11. Testraum mit Blickfenster
12. Abnehmbare Bodenplatte für die Entnahme von Staubproben
13. Zur Absaugung

Abbildung 9: Schematische Darstellung der von Ballal [24] genutzten Versuchsanordnung

### 6.2.6 Empfehlung zur Druckabhängigkeit der Mindestzündenergie

Die vorliegende Datenbasis reicht für eine Abschätzung der Druckabhängigkeit der Mindestzündenergie nicht aus. Dies liegt in erster Linie daran, dass in den vorliegenden Veröffentlichungen die Staubkonzentrationen konstant gehalten wurden. Es ist bekannt, dass sich die zündfreudigste Staubkonzentration bei höheren Anfangsdrücken zu höheren Werten verschiebt.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass eine Erhöhung des Anfangsdrucks eine Reduzierung der Mindestzündenergie hervorruft.

### 6.2.7 Übersicht über die Abhängigkeit der Mindestzündenergie von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration

Nachfolgend in Tabelle 7 aufgeführt ist eine Zusammenfassung der ermittelten Abhängigkeiten der Mindestzündenergie von den Prozessparametern Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration. Aufgeführt werden ebenfalls die gültigen Abschätzmethoden mit dazugehörigen Gültigkeitsgrenzen.

Tabelle 7: Verhalten der Mindestzündenergie gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der Mindestzündenergie	Gültige Abschätzung	Gültigkeitsbereich
Druck	$\leq 0,8$ bar abs.	keine Erkenntnisse	z. Z. nicht möglich	-
	$\geq 1,1$ bar abs.	Abnahme		-
Temperatur	$> 25$ °C	Abnahme	Gleichung (2) Gleichung (3)	Qualitative Abschätzung der Größenordnung bis 200 °C
Sauerstoffvolumenanteil	$< 21$ Vol.-%	Zunahme	Gleichung (1)	Qualitative Abschätzung der Größenordnung
	$> 21$ Vol.-%	Abnahme	z. Z. nicht möglich	-

### 6.3 Explosionsfähigkeit

Über das Verhalten der Explosionsfähigkeit eines Staubes bei nicht-atmosphärischen Prozessbedingungen liegen keine Veröffentlichungen vor. Vermutlich werden Stäube, welche bei Umgebungstemperaturen nicht explosionsfähig sind, bei erhöhter Umgebungstemperatur noch gezündet.

### 6.4 Untere Explosionsgrenze

Die untere Explosionsgrenze beschreibt die niedrigste Staubkonzentration in einem System, welche gerade eben eine explosionsfähige Atmosphäre bildet. Die Bestimmung der unteren Explosionsgrenze im Labor erfolgt gemäß der DIN EN 14034-3 [25]. Diese sieht die Bestimmung der unteren Explosionsgrenze im 1 m<sup>3</sup>-Behälter vor. Als Zündquelle sind zwei

chemische Zünder mit je 5 kJ Zündenergie vorgesehen, die Zündverzögerungszeit soll 600 ms betragen. Alternativ kann die Prüfung in der 20 l-Laborapparatur erfolgen. Diese verwendet zwei chemische Zünder mit Zündenergien von jeweils 1 kJ, die Zündverzögerungszeit wird auf 60 ms reduziert. Die Untersuchungen beginnen bei einer Staubkonzentration von 500 g/m<sup>3</sup>. Anschließend wird die Staubkonzentration solange um jeweils 50 % reduziert bis keine Explosion mehr erfolgt. Im 1 m<sup>3</sup>-Behälter gilt ein gemessener Überdruck von 0,3 bar und in der 20 l-Laborapparatur ein Überdruck von 0,5 bar als Explosion. Die höchste Konzentration, bei welcher keine Explosion mehr beobachtet wird, wird als untere Explosionsgrenze bezeichnet.

### **6.4.1 Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze von der Sauerstoffkonzentration**

Wiemann [26, 27, 28, 29, 30] untersuchte verschiedene organische Stäube im 1 m<sup>3</sup>-Behälter unter sauerstoffreduzierter Atmosphäre. Zu den untersuchten Stäuben zählten Torf, Buche, Geliermittel, Sprühmagermilch, Cellulose, Naphthalsäureanhydrid sowie Braun-, Gasflamm-, und Fettkohle mit Medianwerten zwischen 16 µm und 65 µm. Zum Einblasen des Staubes wurde ein Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch genutzt, welches eine identische Zusammensetzung wie die Atmosphäre im 1 m<sup>3</sup>-Behälter besaß. Wiemann beobachtete in diesen Inertisierungsversuchen, dass die untere Explosionsgrenze mit sinkender Sauerstoffkonzentration leicht ansteigt. Explizite Messergebnisse oder Berechnungsverfahren wurden von Wiemann nicht veröffentlicht.

### **6.4.2 Empfehlung zur Sauerstoffabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze**

Anhand der oben aufgeführten Erkenntnisse lässt sich eine Zunahme der unteren Explosionsgrenze in sauerstoffreduzierten Atmosphären ableiten. Für die Praxis wird empfohlen, dass für eine konservative Abschätzung die im Labor bei Standardbedingungen bestimmte untere Explosionsgrenze für diese Prozessbedingungen herangezogen wird. Dies ist notwendig, da u. U. auch bei inert betriebenen verfahrenstechnischen Anlagen während der An- und Abfahrvorgänge atmosphärische Bedingungen vorliegen können.

Es ist zu vermuten, dass eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration keinen bzw. nur wenig Einfluss auf die untere Explosionsgrenze besitzt. Dies kann darin begründet werden, dass bereits bei der Bestimmung der unteren Explosionsgrenze unter atmosphärischen Bedingungen der Sauerstoff im Überschuss vorhanden ist.



### 6.4.3 Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze von der Temperatur

Glerner [16] untersuchte in einer 20 l-Laborapparatur das Verhalten der unteren Explosionsgrenze in einem Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C. Für die Untersuchungen wurden pyrotechnische Zünder mit 10 kJ Zündenergie bei einer Zündverzögerungszeit von 60 ms genutzt. Untersucht wurden die Stäube von Lycopodium, Kohle und Melamin mit Korngrößen < 63 µm. Diese Stäube wurden vor Versuchsbeginn in einem Trockenschrank auf die jeweilige Versuchstemperatur aufgeheizt und anschließend im aufgeheizten Zustand der Staubvorlage zugeführt. Glerner beobachtete bei diesen Versuchen eine Abnahme der unteren Explosionsgrenze mit steigender Temperatur.

Wiemann [26, 31] untersuchte im 1 m<sup>3</sup>-Behälter den Einfluss der Temperatur auf die untere Explosionsgrenze. Zu den untersuchten Stäuben zählten Torf, Buche, Geliermittel, Sprühmagermilch, Cellulose, Naphthalsäureanhydrid sowie Braun-, Gasflamm-, und Fettkohle mit Medianwerten zwischen 16 µm und 65 µm. In diesen Versuchen variierte Wiemann die Behältertemperatur zwischen 50 °C und 200 °C. Sowohl die Staubtemperatur, als auch die Temperatur der für den Druckstoß verwendeten Luft wurden bei Raumtemperatur belassen. In diesem Versuchsaufbau beobachtete Wiemann eine lineare Abnahme der unteren Explosionsgrenze bei steigenden Behältertemperaturen. In Abhängigkeit von dem Anteil an flüchtigen Bestandteilen im Staub beschrieb Wiemann diese Abhängigkeit mit Gleichung (7):

$$UEG(T) = UEG(T_0) \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (7)$$

UEG bezeichnet die untere Explosionsgrenze in g/m<sup>3</sup>,  $\alpha$  beziffert die prozentuale Änderung der unteren Explosionsgrenze pro Kelvin in Abhängigkeit von dem Anteil an flüchtigen Bestandteilen im Staub in  $\frac{g}{m^3 \cdot K}$ . Gemäß Gleichung (8) ergibt sich  $\alpha$  zu:

$$\alpha = -8,75 \cdot 10^{-4} - 4,77 \cdot 10^{-5} \cdot F_{waf} \quad (8)$$

Mit  $F_{waf}$  wird der Anteil an flüchtigen Bestandteilen im Staub bezeichnet. Die Bestimmung der flüchtigen Bestandteile des Staubes erfolgt im Labor gemäß DIN EN 51720 [32]. Ist  $F_{waf}$  nicht bekannt, soll laut Wiemann für  $\alpha$  der empirische Mittelwert der durchgeführten Messreihen verwendet werden:

$$\alpha = -0,0027 \left[ \frac{g}{m^3 \cdot K} \right] \quad (9)$$

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Untere Explosionsgrenze

Die gesamte Übersicht der von Wiemann zur Mittelwertbildung herangezogenen Werte für  $\alpha$  findet sich in Tabelle 8.

**Tabelle 8: Von Wiemann [26] ermittelte Werte von  $\alpha$**

Stoff	$\alpha \cdot 10^{-3} \left[ \frac{g}{m^3 \cdot K} \right]$	Medianwert [ $\mu m$ ]
Braunkohle	-3,2	52
Gasflammkohle	-2,8	19
Fettkohle	-2,2	19
Torf	-4,5	26
Buche	-2,9	59
Geliermittel	-2,2	43
Sprühmagermilch	-2,9	65
Methylcellulose	-1,9	49
Naphthalsureanhydrid	-3,5	16

Den niedrigsten Wert für  $\alpha$ , also die größte Abnahme der unteren Explosionsgrenze, verzeichnete Wiemann für Torf mit:

$$\alpha = -0,00447 \left[ \frac{g}{m^3 \cdot K} \right] \quad (10)$$

Das bedeutet, dass die untere Explosionsgrenze von Torf bei einem Temperaturanstieg von 100 K um 44,7 % sinkt.

Abbildung 10 zeigt den Vergleich zwischen berechneten unteren Explosionsgrenzen nach Gleichung (7) mit experimentellen Daten von Wiemann [26, 31]. Für die Berechnung wurde ein konstanter Faktor  $\alpha = -0,0027$  angenommen.

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Untere Explosionsgrenze

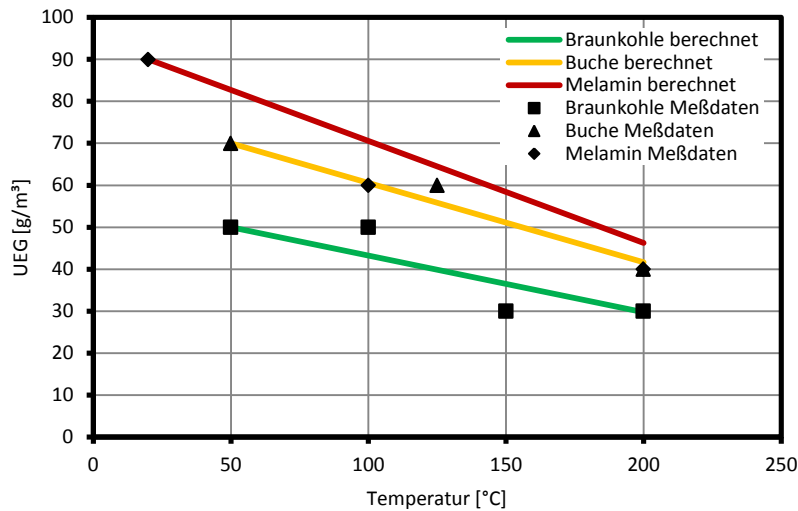


Abbildung 10: Vergleich von mit Gleichung (7) berechneten unteren Explosionsgrenzen und experimentell ermittelten. Experimentelle Werte entnommen aus [16, 26]

Eine alternative Berechnung der unteren Explosionsgrenze liefert Cashdollar [33, 34]. Seine Untersuchungen an Pittsburgh Kohle und Polyethylen in einer 20 l-Laborapparatur vergleicht Cashdollar mit berechneten Werten aus der modifizierten Burghess Wheeler Gleichung:

$$UEG(T) = UEG(T_0) \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right) \cdot [1 - 0,000721 \cdot (T - T_0)] \quad (11)$$

Abbildung 11 zeigt den Vergleich zwischen berechneten Werten der unteren Explosionsgrenze nach der Burghess-Wheeler Gleichung mit experimentellen Daten von Wiemann und Glarner.

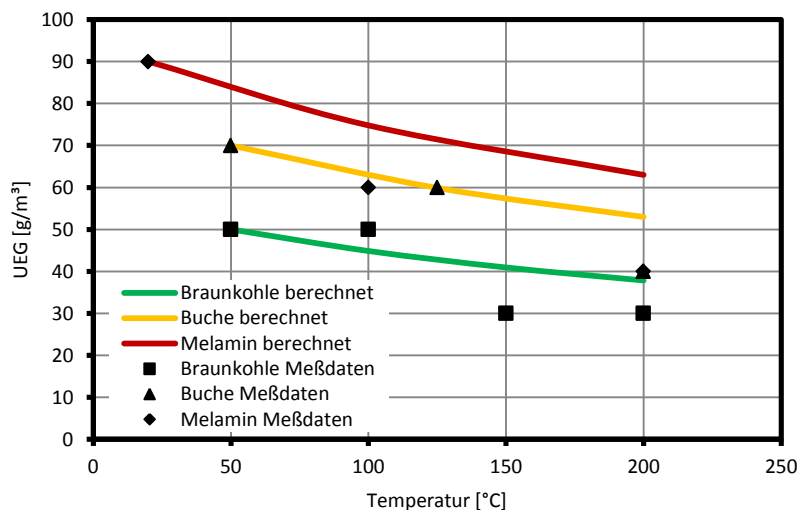


Abbildung 11: Vergleich von experimentellen Daten aus [15, 25] mit den berechneten Werten der unteren Explosionsgrenze gemäß der Burghess-Wheeler Gleichung

### 6.4.4 Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze

Die vorliegenden Publikationen zeigen, dass mit einer tendenziellen Abnahme der unteren Explosionsgrenze bei steigenden Umgebungstemperaturen zu rechnen ist. Ist der Anteil an

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Untere Explosionsgrenze

flüchtigen Bestandteilen im Staub bekannt, ist die Berechnung der reduzierten unteren Explosionsgrenze für Temperaturen bis zu 300 °C mit Gleichung (7) möglich.

Für einen unbekanntem Anteil an flüchtigen Bestandteilen kann mit den Gleichungen (7) und (11) keine belastbare qualitative Abschätzung der unteren Explosionsgrenze getroffen werden. Ist es notwendig, belastbare Aussagen zu erlangen, müssen Laborversuche durchgeführt werden.

### 6.4.5 Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze vom Anfangsdruck

Über das Verhalten der unteren Explosionsgrenze bei erhöhten Anfangsdrücken liegen verschiedene Veröffentlichungen vor. Im 1 m<sup>3</sup>-Behälter untersuchte Wiemann [28] das Verhalten der unteren Explosionsgrenze von Braunkohlestaub mit einem Medianwert von 52 µm bei Anfangsdrücken bis 4 bar abs. Sowohl Cashdollar und Hertzberg [33, 34, 35] als auch Pilao [36, 37] untersuchten die untere Explosionsgrenze verschiedener organischer Stäube in der 20 l-Laborapparatur. Cashdollar und Hertzberg nutzten hierzu Pittsburgh Kohle und Polyethylen in einem Druckbereich bis 2,5 bar abs. Pilao untersuchte Korkstaub bis zu 2,2 bar abs.

Alle aufgeführten Autoren beobachteten einen linearen Anstieg der unteren Explosionsgrenze bei ansteigenden Anfangsdrücken. Hierzu zeigt Abbildung 12 eine Zusammenfassung der Ergebnisse der aufgeführten Autoren.

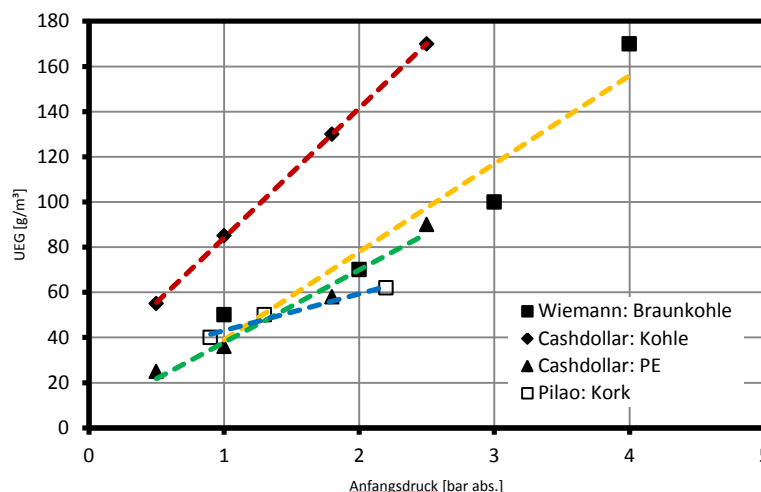


Abbildung 12: Versuchsergebnisse von Wiemann [28], Cashdollar [33, 34, 35] und Pilao [36, 37]

In Abbildung 12 ist die Staubkonzentration in Gramm pro Betriebskubikmeter aufgetragen. Mit steigendem Anfangsdruck steht daher mehr Sauerstoff für die Oxidationsreaktion zur Verfügung. Um eine Flammenausbreitung zu erreichen, muss dementsprechend eine größere Menge Staub aufgewirbelt werden. Bei einer Auftragung in Gramm pro Normkubikmeter

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Untere Explosionsgrenze & Sauerstoffgrenzkonzentration

(Umrechnung ideales Verhalten vorausgesetzt) sinkt die untere Explosionsgrenze mit steigendem Anfangsdruck.

### 6.4.6 Empfehlung zur Druckabhängigkeit der unteren Explosionsgrenze

Die untere Explosionsgrenze steigt mit steigendem Anfangsdruck. Für die Praxis ist es normalerweise ausreichend, den bei atmosphärischen Drücken im Labor bestimmten Wert der unteren Explosionsgrenze heranzuziehen. Für Anfangsdrücke  $< 1$  bar abs. ist mit einer Abnahme der unteren Explosionsgrenze zu rechnen. Der lineare Verlauf der Messwerte in diesem Druckbereich erlaubt bei Bedarf die Berechnung der unteren Explosionsgrenze für einen veränderten Anfangsdruck mit Hilfe der linearen Interpolation.

### 6.4.7 Übersicht über die Abhängigkeit der unteren Explosionsgrenze von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration

Nachfolgend in Tabelle 9 aufgeführt ist eine Zusammenfassung der ermittelten Abhängigkeiten der unteren Explosionsgrenze von den Prozessparametern Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration. Aufgeführt werden ebenfalls die gültigen Abschätzmethoden mit dazugehörigen Gültigkeitsgrenzen.

Tabelle 9: Verhalten der unteren Explosionsgrenze gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

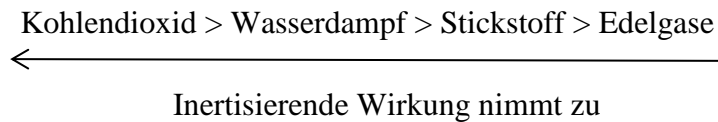
Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der unteren Explosionsgrenze	Gültige Abschätzung	Gültigkeitsbereich
<b>Druck</b>	$\leq 0,8$ bar abs.	Abnahme	Lineare Interpolation	0,5 bar abs. bis 4 bar abs.
	$\geq 1,1$ bar abs.	Zunahme		
<b>Temperatur</b>	$> 25$ °C	Abnahme	Gleichung (7)	bis 300 °C
<b>Sauerstoffvolumenanteil</b>	$< 21$ Vol.-%	keine Abnahme	-	-
	$> 21$ Vol.-%	keine Abnahme	-	-

## 6.5 Sauerstoffgrenzkonzentration

Die Sauerstoffgrenzkonzentration beschreibt die maximale Sauerstoffkonzentration in einem Gemisch aus brennbarem Staub, Luft und einem Inertgas, für welche bei beliebigen Staubkonzentrationen gerade eben keine Explosion mehr stattfindet. Die Kenntnis der Sauerstoffgrenzkonzentration erlaubt dem Anwender, die notwendige Sauerstoffkonzentration in einem System einzustellen, um die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre zu verhindern. Bestimmt wird die Sauerstoffgrenzkonzentration im Labor gemäß der DIN EN 14034 - 4 [38]. Diese sieht als Versuchsaufbau den aus 6.4 bekannten Versuchsaufbau im

1 m<sup>3</sup>-Behälter, oder alternativ die 20 l-Laborapparatur vor. Ausgehend von einer beliebigen Staubkonzentration wird die Sauerstoffkonzentration der Versuchsapparatur solange reduziert, bis keine Explosion mehr festgestellt wird. Anschließend wird die Staubkonzentration variiert. Die Sauerstoffkonzentration, für welche bei beliebigen Staubkonzentrationen keine Explosion mehr festgestellt werden kann, wird als Sauerstoffgrenzkonzentration bezeichnet.

Die in den unten stehenden Kapiteln aufgeführten Versuchsergebnisse wurden jeweils mit Stickstoff als Inertgas ermittelt. Bei der Nutzung der aufgeführten Abschätzmethoden gilt es, dies zu berücksichtigen. Die Wirkung eines Inertgases hängt dabei von dessen Struktur, genauer der Atomanzahl, ab. Im Allgemeinen nimmt die inertisierende Wirkung in unten stehender Reihenfolge zu [27]:



Es ist ersichtlich, dass die dreiatomigen Inertgase (Kohlendioxid, Wasserdampf) eine bessere inertisierende Wirkung besitzen als das zweiatomige Stickstoffmolekül oder einatomige Edelgase. Daher ist zu vermuten, dass die für das Inertgas N<sub>2</sub> aufgeführten Abschätzmethoden ebenfalls für Systeme herangezogen werden können, welche mit Kohlendioxid bzw. Wasserdampf inertisiert wurden. Eine Übertragung auf mit Edelgasen inertisierte Systeme erscheint hingegen nicht möglich.

### 6.5.1 Abhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration von der Temperatur

Glarner [16] untersuchte in einer 20 l-Laborapparatur das Verhalten der Sauerstoffgrenzkonzentration in einem Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C. Es wurden die Stäube von Lycopodium, Kohle und Melamin mit Korngrößen < 63 µm untersucht. Diese Stäube wurden vor Versuchsbeginn in einem Trockenschrank auf die jeweilige Versuchstemperatur aufgeheizt und anschließend im aufgeheizten Zustand der Staubvorlage zugeführt. Glarner beobachtete bei diesen Versuchen eine konstante Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration von 1,8 Vol.-% pro 100 K Temperaturanstieg.

Wiemann [26, 27, 28, 29, 30, 39, 40, 41] untersuchte im 1 m<sup>3</sup>-Behälter den Einfluss der Temperatur auf die Sauerstoffgrenzkonzentration. Zu den untersuchten Stäuben zählten Torf, Buche, Geliermittel, Sprühmagermilch, Cellulose, Naphthalsäureanhydrid sowie Braun-, Gasflamm-, und Fettkohle mit Medianwerten zwischen 16 µm und 65 µm. In diesen

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Sauerstoffgrenzkonzentration

Versuchen variierte Wiemann die Behältertemperatur zwischen 20 °C und 200 °C. Sowohl die Staubtemperatur als auch die Temperatur der für den Druckstoß verwendeten Luft wurden bei Raumtemperatur belassen. In diesem Versuchsaufbau beobachtete Wiemann eine lineare Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration bei steigenden Behältertemperaturen. Diese lineare Abnahme fasst Wiemann in Gleichung (12) zusammen:

$$SGK(T) = SGK(T_0) + \beta \cdot (T - T_0) \quad (12)$$

SGK bezeichnet die Sauerstoffgrenzkonzentration in Vol.-%, mit  $\beta$  wird die vom verwendeten Inertgas abhängige Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration in  $\frac{\text{Vol.-%}}{\text{K}}$  beziffert. Diese kann entweder durch zwei Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt oder laut Wiemann mit dem empirisch bestimmten Mittelwert gleichgesetzt werden:

$$\beta = -13,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vol.-%}}{\text{K}} \quad (13)$$

Die gesamte Übersicht der von Wiemann ermittelten Werte für  $\beta$  findet sich in Tabelle 10. Den niedrigsten Wert für  $\beta$ , also die größte Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration, verzeichnete Wiemann für Buchenstaub mit:

$$\beta = -18,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vol.-%}}{\text{K}} \quad (14)$$

Dieser Wert von  $\beta$  bedeutet eine Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration um ca. 1,9 Vol.-% pro 100 K Temperaturerhöhung.

**Tabelle 10: Von Wiemann [26] ermittelte Werte von  $\beta$  für eine Inertisierung mit Stickstoff**

Stoff	$\beta \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{Vol.-%}}{\text{K}} \right]$	Medianwert [ $\mu\text{m}$ ]
Braunkohle	-14	52
Gasflammkohle	-12,7	19
Fettkohle	-14	19
Torf	-17,3	26
Buche	-18,7	59
Geliermittel	-13,3	43
Sprühmagermilch	-6,7	65
Methylcellulose	-11,1	49
Naphthalsäureanhydrid	-11	16

Abbildung 13 zeigt den Vergleich zwischen berechneten Sauerstoffgrenzkonzentrationen nach Gleichung (12) mit experimentellen Daten von Wiemann. Für die Berechnung wurde ein konstanter Faktor  $\beta = -13,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Vol.-%}}{\text{K}}$  angenommen.

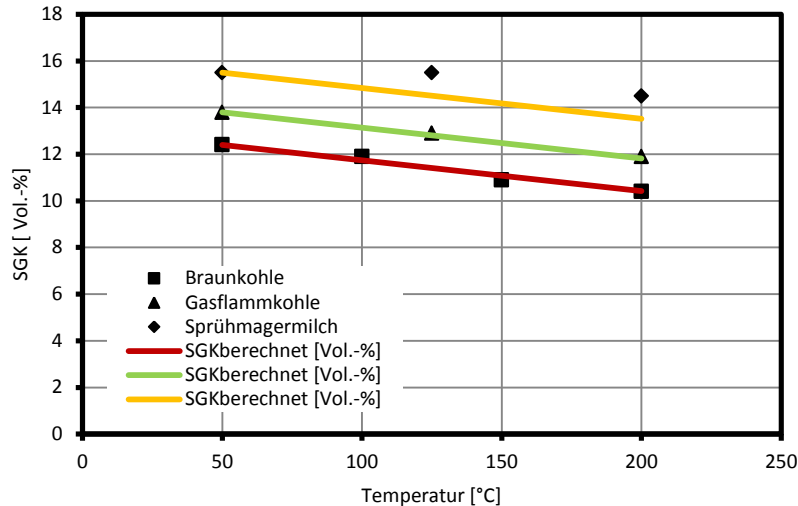


Abbildung 13: Vergleich von experimentellen Daten aus [26] mit den berechneten Werten der Sauerstoffgrenzkonzentration gemäß Gleichung (12)

### 6.5.2 Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration

Die vorliegenden Veröffentlichungen zeigen, dass mit einer tendenziellen Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration für steigende Umgebungstemperaturen zu rechnen ist. Die Kenntnis der reduzierten Sauerstoffgrenzkonzentration bei erhöhten Umgebungstemperaturen ist für eine sicher durchgeführte Inertisierung erforderlich. Für die von Wiemann und Glarner untersuchten organischen Stäube kann eine Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration von 2 Vol.-% pro 100 K Temperaturerhöhung für die Anwendung in der Praxis angenommen werden.

Wenn bereits ein Messwert bei erhöhter Umgebungstemperatur vorliegt, ist es möglich die Sauerstoffgrenzkonzentration von organischen Stäuben bei anderen Umgebungstemperaturen rechnerisch zu ermitteln. Diese Abschätzung kann für Temperaturen bis zu 300 °C mit Gleichung (12) unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabschlages von ca. 10 %, erfolgen.

### 6.5.3 Abhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration vom Anfangsdruck

Über das Verhalten der Sauerstoffgrenzkonzentration bei erhöhten Anfangsdrücken liegen verschiedene Veröffentlichungen vor. Im 1 m<sup>3</sup>-Behälter untersuchte Wiemann [27, 28] das Verhalten der Sauerstoffgrenzkonzentration von Braunkohlestaub mit einem Medianwert von 52 µm bei Anfangsdrücken bis 4 bar abs. Walther [8] untersuchte die Sauerstoffgrenz-



konzentration von Erbsenmehl, Braunkohle und einem Polymer in der 20 l-Laborapparatur. Der Anfangsdruck des Systems wurde ebenfalls bis auf 4 bar abs. erhöht.

Die aufgeführten Autoren beobachteten eine lineare Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration bei erhöhten Anfangsdrücken. Die größte Abnahme bei den untersuchten Stäuben wies die von Wiemann untersuchte Braunkohle mit einer Abnahme von knapp 0,3 Vol.-% pro bar auf. Hierzu zeigt Abbildung 14 eine Zusammenfassung der Ergebnisse der genannten Autoren.

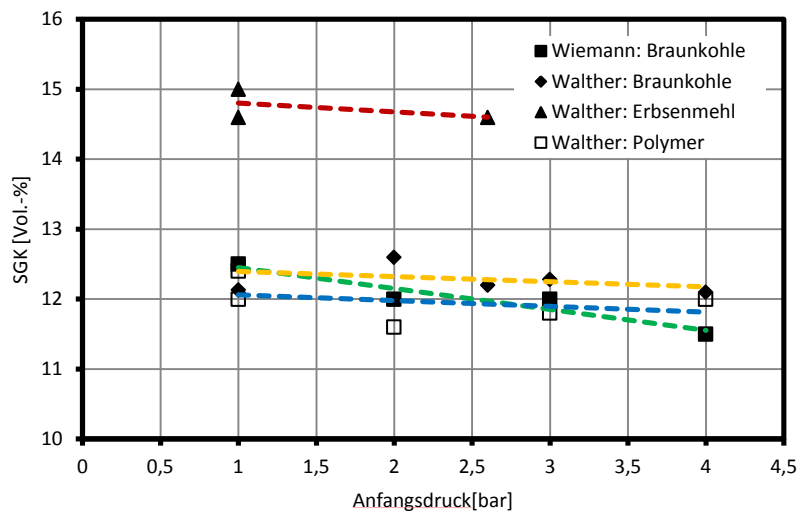


Abbildung 14: Versuchsergebnisse von Wiemann [27, 28] und Walther [8]

### 6.5.4 Empfehlung zur Druckabhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration

Anhand der oben aufgeführten Ergebnisse lässt sich eine nicht signifikante, lineare Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration von organischen Stäuben bei Anfangsdrücken in einem Bereich von 1 bar abs. bis 4 bar abs. ableiten. Es ist zu beachten, dass dieser Wert nicht abgesichert ist. Unter Umständen ist aufgrund von Unsicherheiten in der Versuchsdurchführung (Staubeinblasung, Verhalten der Zünder unter höheren Druck) eine größere Abnahme der Sauerstoffgrenzkonzentration möglich.

### 6.5.5 Übersicht über die Abhängigkeit der Sauerstoffgrenzkonzentration von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration

Nachfolgend in Tabelle 11 aufgeführt ist eine Zusammenfassung der ermittelten Abhängigkeiten der Sauerstoffgrenzkonzentration von den Prozessparametern Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration. Aufgeführt werden ebenfalls die gültigen Abschätzmethoden mit dazugehörigen Gültigkeitsgrenzen.

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Sauerstoffgrenzkonzentration, maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

Tabelle 11: Verhalten der Sauerstoffgrenzkonzentration gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten der Sauerstoffgrenzkonzentration	Gültige Abschätzung	Gültigkeitsbereich
<b>Druck</b>	$\leq 0,8$ bar abs.	keine Erkenntnisse	z. Z. nicht möglich	-
	$\geq 1,1$ bar abs.	Abnahme		
<b>Temperatur</b>	$> 25$ °C	Abnahme	Gleichung (12)	bis 300 °C, mit 10 % Sicherheit

### 6.6 Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

Der maximale Explosionsdruck beschreibt den Höchstwert des Explosionsdruckes, der sich bei den gesamten explosionsfähigen Konzentrationsbereich des Staubes abdeckenden Prüfungen ergibt. Der  $K_{St}$ -Wert ist eine volumenunabhangige Kenngröße, welche mit dem kubischen Gesetz berechnet wird. Dieses setzt sich zusammen aus dem maximalen zeitlichen Druckanstieg und der dritten Wurzel des Prufbehaltervolumens.

Die Anwendung des maximalen Explosionsdrucks und des  $K_{St}$ -Wertes erlaubt die Auslegung konstruktiver Explosionsschutzmanahmen. Die Bestimmung dieser Kenngrößen erfolgt im Labor gemäß der DIN EN 14034-1 [42] und DIN EN 14034-2 [43]. Diese Norm sieht die Bestimmung vom maximalen Explosionsdruck und  $K_{St}$ -Wert in den aus 6.4 bekannten 1 m<sup>3</sup>-Behälter und 20 l-Laborapparatur vor. Anders als bei der Bestimmung der übrigen Kenngrößen werden die Kenngrößen maximaler Explosionsdruck und  $K_{St}$ -Wert in der 20 l-Laborapparatur mit 2 chemischen Zündern mit je 5 kJ ermittelt. Beginnend bei einer Staubkonzentration von 250 g/m<sup>3</sup> werden die Explosionsdrücke für verschiedene Staubkonzentrationen ermittelt. Hierzu wird die Staubkonzentration entweder um jeweils 50 % verringert oder in 250 g/m<sup>3</sup> Schritten erhöhet. Der höchste gemessene Explosionsdruck wird als maximaler Explosionsdruck bezeichnet. Mit dem maximalen Druckanstieg während einer Explosion kann mit dem kubischen Gesetz der  $K_{St}$ -Wert berechnet werden.

#### 6.6.1 Abhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes vom Anfangsdruck

Sowohl Wiemann [27, 28] als auch Lazaro [44] untersuchten das Verhalten des maximalen Explosionsdrucks und des  $K_{St}$ -Wertes bei von atmosphärischen Bedingungen abweichenden Anfangsdrücken im 1 m<sup>3</sup> Behälter. Wiemann untersuchte hierzu Braunkohlestaub mit einem

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

Medianwert von 52  $\mu\text{m}$  in einem Bereich bis 4 bar abs., Lazaro untersuchte *Bituminous coal* bei Anfangsdrücken bis 15 bar abs.

Weitere Untersuchungen wurden von verschiedenen Autoren in der 20 l-Laborapparatur durchgeführt. Glarner [16] untersuchte in dieser das Verhalten von Lycopodium, Erbsenmehl und Melamin mit Korndurchmesser  $< 63 \mu\text{m}$  in einem Druckbereich zwischen 0,65 bar abs. und 1,6 bar abs. Pilao [36, 37] untersuchte Kork bei Anfangsdrücken bis 2,2 bar abs. und Horstmann [45] Polyethylen in einem Druckbereich von 80 mbar abs. bis 1080 mbar.

Kuai [3] publizierte als einziger Autor Untersuchungen von Metallstäuben. Hierfür wurden die Kenngrößen eines Magnesiumstaubes bis 1,6 bar abs. untersucht. Dabei führte Kuai alle Versuche für die bei atmosphärischen Drücken zündfreudigste Staubkonzentration durch.

Alle aufgeführten Veröffentlichungen zeigen eine proportionale Zunahme des maximalen Explosionsdrucks vom Anfangsdruck. Hierzu zeigt Abbildung 15 einige Versuchsergebnisse der genannten Autoren:

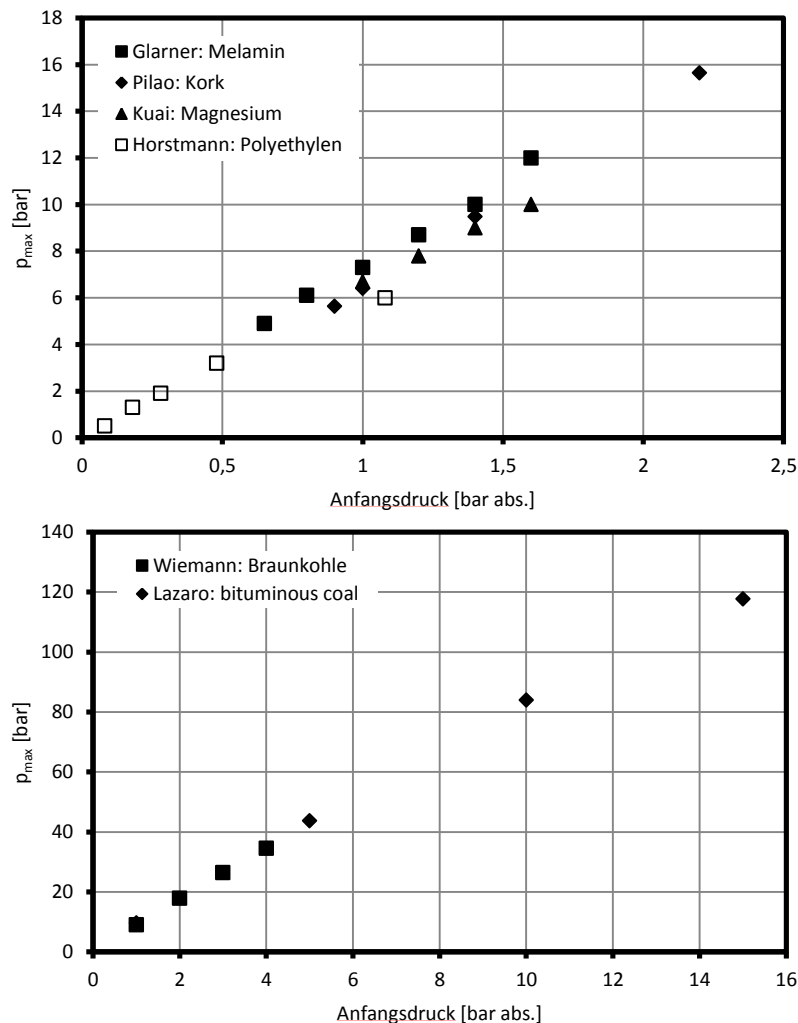


Abbildung 15: Versuchsergebnisse von Glarner [16], Pilao [36, 37], Kuai [3], Horstmann [45], Wiemann [27, 28] und Lazaro [44]

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

Diese Proportionalität fasst Wiemann in Gleichung (15) zusammen:

$$p_{max} = p_{max,0} \cdot \frac{p_V}{p_0} \quad (15)$$

Hier wird mit  $p$  der Druck in bar bezeichnet. Der Index max steht für den maximalen Explosionsdruck, V für den gesuchten Anfangsdruck.

Hierzu zeigt Abbildung 16 den Vergleich von mit Gleichung (15) berechneten maximalen Explosionsdrücken mit von Wiemann und Kuai experimentell ermittelten Versuchsergebnissen im Gültigkeitsbereich bis 4 bar abs.:

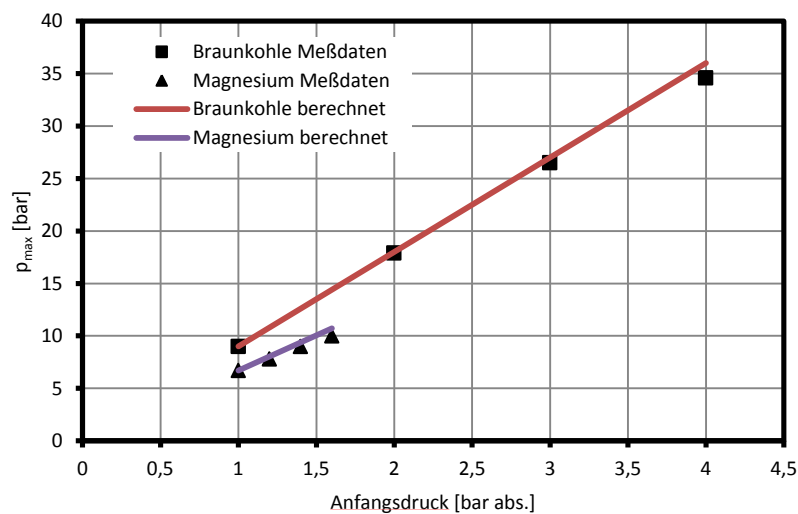


Abbildung 16: Vergleich von berechneten maximalen Explosionsdrücken gemäß Gleichung (15) mit veröffentlichten Messergebnissen von Wiemann [27, 28] und Kuai [3]

Analog zum Verhalten des maximalen Explosionsdrucks beobachteten die oben aufgeführten Autoren für den  $K_{St}$ -Wert ebenfalls eine proportionale Zunahme bei steigenden Anfangsdrücken. Wiemann veröffentlichte für diesen Zusammenhang Gleichung (16):

$$K_{ST} = K_{ST,0} \cdot \frac{p_V}{p_0} \quad (16)$$

Ein Vergleich von berechneten  $K_{St}$ -Werten gemäß Gleichung (16) mit von Wiemann und Glarner ermittelten Werten ist in Abbildung 17 dargestellt.

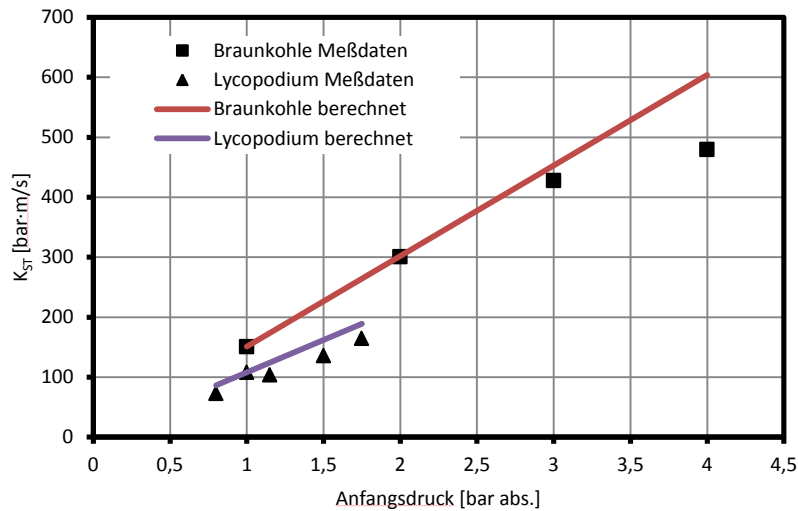


Abbildung 17: Vergleich von mit Gleichung (16) berechneten  $K_{St}$ -Werten mit von Wiemann [27, 28] und Glarner [16] experimentell ermittelten Werten

### 6.6.2 Empfehlung zur Druckabhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -wertes

Die aufgeführten Veröffentlichungen zeigen, dass mit einer proportionalen Zunahme des maximalen Explosionsdrucks und des  $K_{St}$ -wertes mit steigenden Anfangsdrücken zu rechnen ist. Eine Abschätzung des maximalen Explosionsdrucks für Anfangsdrücke bis zu 4 bar abs. kann mit Gleichung (15) erfolgen.

Mit Hilfe von Gleichung (16) können für den  $K_{St}$ -Wert konservative Abschätzungen für Anfangsdrücke bis zu 4 bar abs. vorgenommen werden.

### 6.6.3 Abhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -wertes von der Temperatur

Untersuchungen über das Verhalten des maximalen Explosionsdrucks und des  $K_{St}$ -wertes bei erhöhten Umgebungstemperaturen stammen von Wiemann [26, 28, 31, 40] und Glarner [18]. Wiemann untersuchte Torf, Buche, Gelierrmittel, Sprühmagermilch, Cellulose, Naphthalensäureanhydrid sowie Braun-, Gasflamm-, und Fettkohle mit Medianwerten zwischen 16  $\mu\text{m}$  und 65  $\mu\text{m}$  in einem 1  $\text{m}^3$  Behälter. In diesen Versuchen variierte Wiemann die Behältertemperatur zwischen 50 °C und 200 °C. Sowohl die Staubtemperatur als auch die Temperatur der für den Druckstoß verwendeten Luft wurden bei Raumtemperatur belassen.

Untersucht wurden von Glarner Lycopodium, Cellulose, Herbizid, Maisstärke, Erbsenmehl, Melamin sowie zwei Klärschlämme und zwei Farbstoffe für Korndurchmesser < 63  $\mu\text{m}$ . Glarner führte die Untersuchungen in einer 20 l-Laborapparatur in einem Temperaturbereich zwischen 20 °C und 200 °C durch. Die Staubproben wurden vor Versuchsbeginn in einem

Trockenschrank auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt und anschließend der Probenvorlage zugeführt.

Sowohl Wiemann als auch Glarner beobachteten eine lineare Abnahme des maximalen Explosionsdrucks mit steigenden Umgebungstemperaturen. Hierzu zeigt Abbildung 18 eine Auswahl der von Wiemann und Glarner erzielten Ergebnisse.

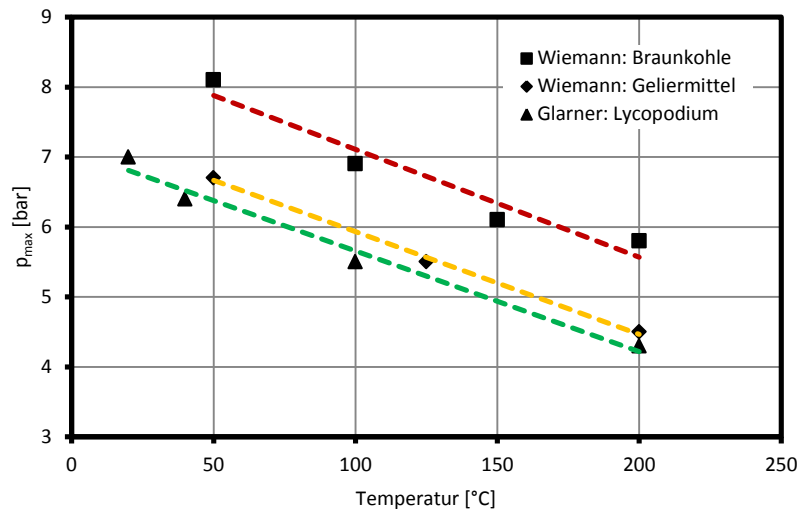


Abbildung 18: Versuchsergebnisse von Wiemann [26, 28, 31, 40] und Glarner [18] für den Einfluss erhöhter Umgebungstemperaturen auf den maximalen Explosionsdruck

Wiemann veröffentlichte auf Basis seiner Versuchsergebnisse Gleichung (17), aus den Versuchsergebnissen von Glarner entwickelte Bartknecht Gleichung (18):

$$p_{max} = p_{max,o} \cdot \left( 0,91 \cdot \frac{T_0}{T} + 0,09 \right) \quad (17)$$

$$p_{max} = p_{max,o} \cdot \left( 0,88 \cdot \frac{T_0}{T} + 0,12 \right) \quad (18)$$

In die obigen Gleichungen ist die Temperatur in [K] einzusetzen. Die Differenz zwischen den Koeffizienten lässt sich auf Messungenauigkeiten zurückführen. Abbildung 19 zeigt den Vergleich zwischen berechneten Werten des maximalen Explosionsdrucks mit Messdaten, die von Wiemann und Glarner ermittelt wurden. Es wird ersichtlich, dass beide Gleichungen bei Temperaturen bis zu 200 °C zu ähnlichen Ergebnissen kommen.

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

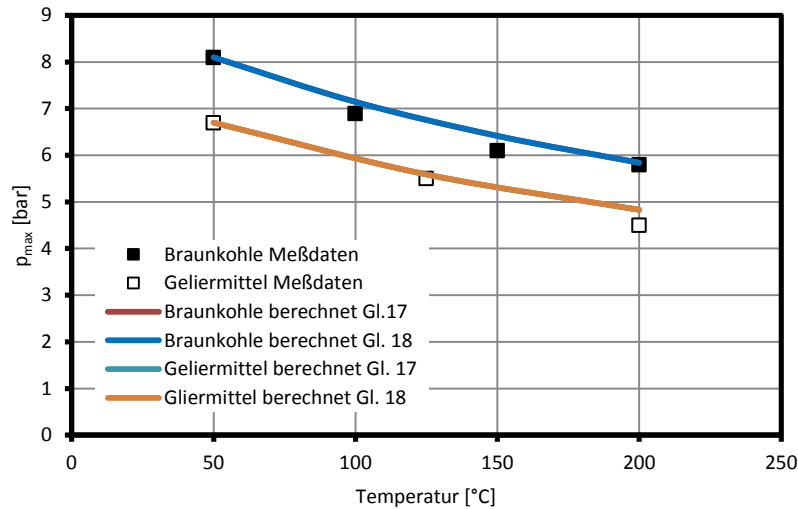


Abbildung 19: Vergleich von mit den Gleichungen (17) und (18) berechneten maximalen Explosionsdrücken mit von Wiemann [26, 28, 31, 40] und Glarner [18] experimentell ermittelten Werten

Für die untersuchten ST1-Stäube stellte Glarner fest, dass Stäube mit  $K_{St}$ -Werten unter  $100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$ , heftiger reagieren. Für  $K_{St}$ -Werte zwischen  $100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  und  $150 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  verändert sich der  $K_{St}$ -Wert bei erhöhten Temperaturen nicht signifikant. Stäube mit  $K_{St}$ -Werten oberhalb von  $150 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  nehmen in ihrer Explosionsheftigkeit ab. Abbildung 20 zeigt hierzu von Wiemann experimentell ermittelte  $K_{St}$ -Werte verschiedener organischer Stäube bei steigenden Temperaturen. Diese Werte untermauern die These Glarners.

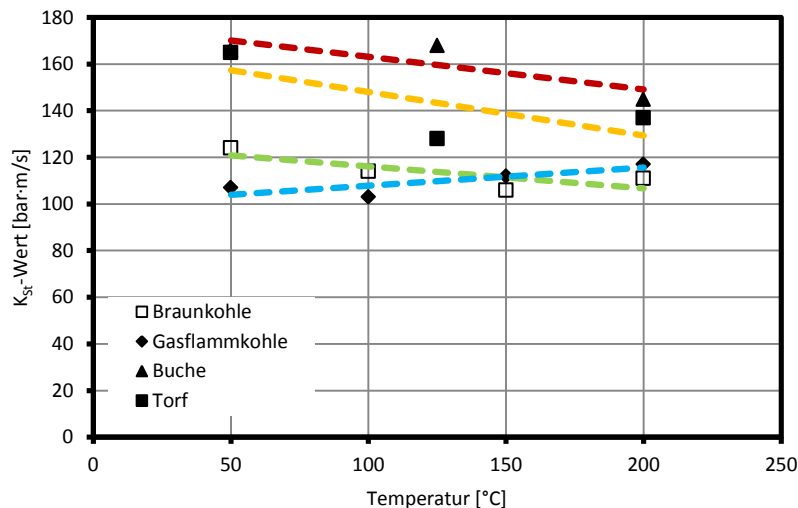


Abbildung 20: Von Wiemann [26] experimentell ermittelte  $K_{St}$ -Wert verschiedener organischer Stäube bei unterschiedlichen Temperaturen

### 6.6.4 Empfehlung zur Temperaturabhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -wertes

Die oben aufgeführten Literaturstellen zeigen, dass der maximale Explosionsdruck mit steigender Temperatur abnimmt. Eine Berechnung des reduzierten maximalen Explosions-

drucks bei erhöhten Umgebungstemperaturen ist sowohl mit Gleichung (17) als auch mit Gleichung (18) in einem Temperaturbereich bis 200 °C für organische Stäube möglich.

Das Verhalten des  $K_{St}$ -Wertes kann zurzeit nur für ST1-Stäube abgeschätzt werden. Für diese Stäube gilt folgende Einteilung: Stäube mit

- $K_{St}$ -Werten  $< 100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  unterliegen tendenziell einer Zunahme der Explosionsheftigkeit
- $K_{St}$ -Werte zwischen  $100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  und  $150 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  besitzen keine Temperaturabhängigkeit
- $K_{St}$ -Werte  $> 150 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$  unterliegen tendenziell einer Abnahme der Explosionsheftigkeit

Eine Berechnung des Temperatureinflusses auf den  $K_{St}$ -Wert ist zurzeit nicht möglich.

### **6.6.5 Abhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes von der Sauerstoffkonzentration**

Glarner [16] untersuchte Lycopodium, Erbsenmehl und Melamin mit Korndurchmesser  $< 63 \mu\text{m}$  in der 20 l-Laborapparatur bei Sauerstoffkonzentrationen zwischen der Sauerstoffgrenzkonzentration und einem Sauerstoffvolumenanteil von 32,9 Vol.-%. Die Staubproben wurden dem Vorlagebehälter unbehandelt zugeführt, im Inneren des Staubes lag also ein Sauerstoffvolumenanteil von 21 Vol.-% vor. Im Staubvorratsbehälter wurde der gleiche Sauerstoffvolumenanteil wie im Prüfbehälter eingestellt.

Ebenfalls in einer 20 l-Laborapparatur untersuchte Mittal [46] das Explosionsverhalten zweier nicht näher benannter Kohlen bei abweichenden Sauerstoffkonzentrationen.

Wiemann [26, 28, 31, 40] untersuchte verschiedene organische Stäube im 1 m<sup>3</sup>-Behälter unter sauerstoffreduzierter Atmosphäre. Zu den untersuchten Stäuben zählten Torf, Buche, Geliermittel, Sprühmagermilch, Cellulose, Naphthalsäureanhydrid sowie Braun-, Gasflamm-, und Fettkohle mit Medianwerten zwischen 16  $\mu\text{m}$  und 65  $\mu\text{m}$ . Zum Einblasen des unbehandelten Staubes wurde ein Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch genutzt, welches eine identische Zusammensetzung wie die Atmosphäre im 1 m<sup>3</sup> Behälter besaß.

Zudem ermittelten die Autoren die Sauerstoffkonzentration für beliebige isochore Mehrkomponenten Reaktionssysteme mit Hilfe des idealen Gasgesetzes nach Gleichung (19).



$$c_{O_2} = \frac{p \cdot y_{O_2}}{100 \cdot R \cdot T} \quad (19)$$

Mit  $c_{O_2}$  wird die im System vorliegende Sauerstoffkonzentration in mol/m<sup>3</sup> bezeichnet.  $y_{O_2}$  bezeichnet den Sauerstoffvolumenanteil im System in Vol.-%. Unter Standardbedingungen (1,013 bar, 25 °C, Luft ) ergibt sich nach obiger Formel für Luft eine Sauerstoffkonzentration von 8,47 mol/m<sup>3</sup>. Durch Auftragen des maximalen Explosionsdrucks über die mit Gleichung (19) ermittelten Sauerstoffkonzentrationen zeigten die Autoren, dass der maximale Explosionsdruck ausschließlich von der Sauerstoffkonzentration (mol/m<sup>3</sup>) abhängt, vgl. Abbildung 21.

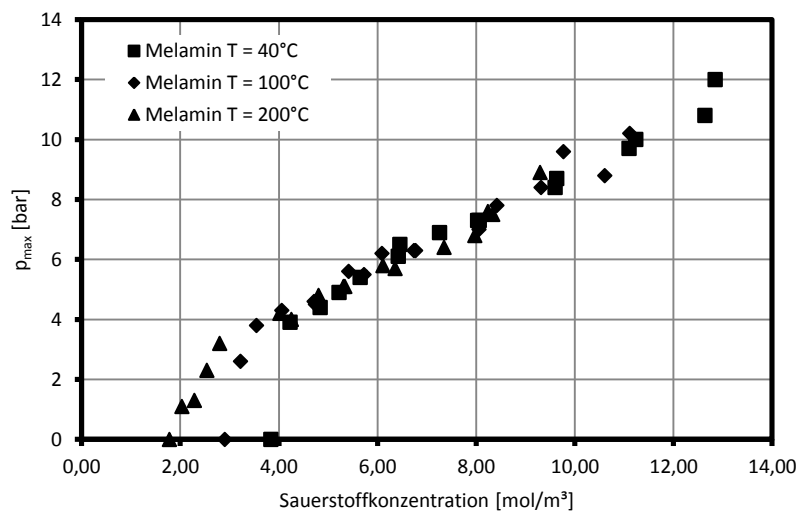


Abbildung 21: Verhalten des maximalen Explosionsdrucks in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration für verschiedene Umgebungstemperaturen; Daten entnommen aus [16].

Wiemann [26] stellt für eine Änderung des Anfangsdrucks und/oder der Umgebungstemperatur die empirische Gleichung (20) vor.

$$p_{max}(T, p) = p_{max}(T_0, p_0, 21 \text{ Vol. } -\% O_2) \cdot (0,103 + 0,166 \cdot c_{O_2}) \quad (20)$$

Die hierin benötigte Sauerstoffkonzentration  $c_{O_2}$  soll nach Gleichung (19) berechnet werden. Da der maximale Explosionsdruck in der Nähe der Sauerstoffgrenzkonzentration abrupt auf 0 bar abfällt, werden mit dieser Gleichung die maximalen Explosionsdrücke in der Nähe der Sauerstoffgrenzkonzentration zu hoch eingeschätzt. Generell ist dies, wie Abbildung 22 zeigt, für alle berechneten maximalen Explosionsdrücke der Fall.

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

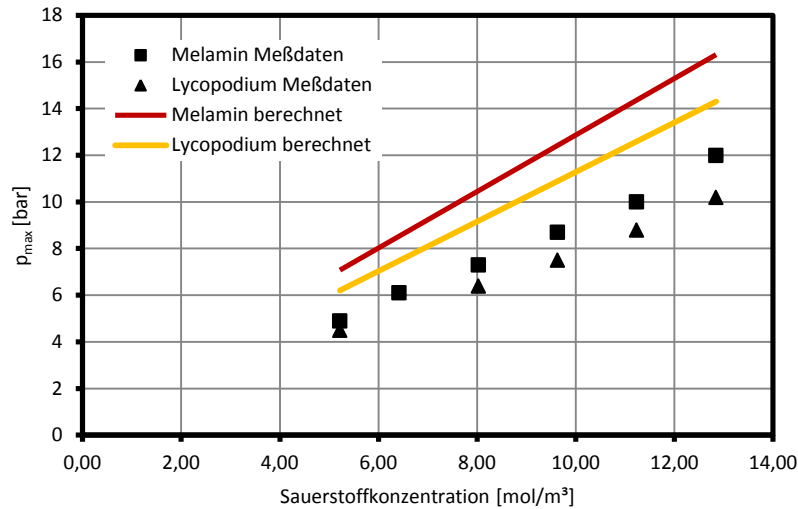


Abbildung 22: Vergleich berechneter maximaler Explosionsdrücke mit von Glarner [16] experimentell ermittelten Werten

Eckhoff [47] veröffentlichte für die Berechnung des maximalen Explosionsdrucks für Sauerstoffvolumenanteile größer der Sauerstoffgrenzkonzentration des Staubes die Gleichung (21):

$$p_{max} = p_{max,21} \cdot \left( \frac{y_{O_2}}{21} \right) \quad (21)$$

$p_{max,21}$  bezeichnet den maximalen Explosionsdruck bei einem Sauerstoffvolumenanteil von 21 Vol.-%,  $y_{O_2}$  bezeichnet den Sauerstoffvolumenanteil im System in Vol.-%, auch für Werte  $> 21$  Vol.-%. Ein Vergleich der nach Gleichung (21) berechneten maximalen Explosionsdrücke mit experimentellen Werten ist in Abbildung 23 dargestellt.

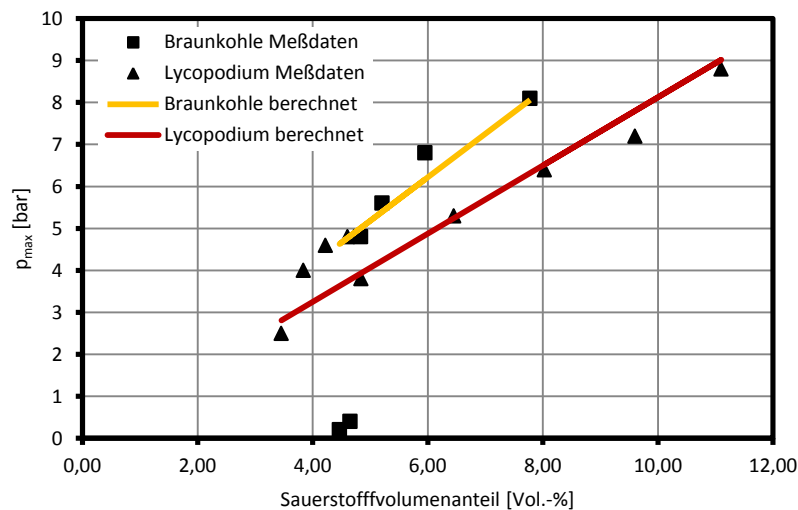


Abbildung 23: Vergleich von mit Gleichung (21) berechneten maximalen Explosionsdrücken mit experimentellen Werten; Daten entnommen aus [16] und [26]

Durch Auftragen des  $K_{St}$ -Wertes über die nach Gleichung (19) berechnete Sauerstoffkonzentration für die Messungen des  $K_{St}$ -Wertes bei unterschiedlichen Temperaturen und

Anfangsdrücken zeigte sich eine gleichzeitige Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration und der Umgebungstemperatur.

Eckhoff [47] veröffentlichte für die Berechnung des  $K_{St}$ -Wertes für Sauerstoffvolumenanteile größer der Sauerstoffgrenzkonzentration des Staubes die Gleichung (22):

$$K_{St} = K_{St,21} \cdot \frac{y_{O_2} - SGK}{21 - SGK} \quad (22)$$

$K_{St,21}$  bezeichnet den Referenz  $K_{St}$ -Wert bei atmosphärischen Bedingungen. Mit  $y_{O_2}$  wird der im System vorliegende Sauerstoffvolumenanteil in Vol.-% bezeichnet. SGK bezeichnet die Sauerstoffgrenzkonzentration des betrachteten Staubes. Für Gleichung (22) konnte mangels Messdaten kein Vergleich zwischen berechneten und experimentellen Werten erfolgen.

Der Vollständigkeit halber seien hier noch von Glarner [16] vorgeschlagene Berechnungsmethoden aufgeführt. Für den maximalen Explosionsdruck empfiehlt Glarner die Gleichungen (23) und(24):

$$p_{max} = K \cdot \frac{y_{O_2}}{R \cdot T} \cdot (p - p_x) \quad (23)$$

$$p_{max} = K \cdot \frac{p}{R \cdot T} \cdot \left( y_{O_2} - y_{O_2,x} \cdot \left( \frac{T_0}{T} \right)^n \right) \quad (24)$$

In den oben aufgeführten Gleichungen bezeichnet K eine Steigung zwischen zwei Messpunkten, der Index x bezieht sich auf einen Unterdruck des Systems, bei welchen mit keiner Explosion mehr zu rechnen ist. Der Exponent n muss, wie bereits schon K, durch Messungen im Labor und anschließender Regressionsrechnung gebildet werden.  $y_{O_2}$  bezeichnet den Sauerstoffvolumenanteil im System in Vol.-%.

Für den  $K_{St}$ -Wert schlägt Glarner die Gleichungen (25) und (26) vor:

$$K_{St} = K \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{R \cdot T}\right) \cdot \frac{p}{R \cdot T} \cdot (y_{O_2} - y_{0,O_2})^z \quad (25)$$

$$K_{St} = K \cdot T^u \cdot \frac{p}{R \cdot T} \cdot (y_{O_2} - y_{0,O_2})^z \quad (26)$$

Hier bezeichnet  $E_A$  die Aktivierungsenergie der exothermen Reaktion, z und u sind Exponenten, welche über Laborversuche bestimmt werden müssen.

Eine Berechnung des maximalen Explosionsdrucks und des  $K_{St}$ -Wertes mit den Gleichungen (23) bis (26) erscheint aufgrund der zu ermittelnden Variablen nicht als praktikable Lösung.

### 6.6.6 Empfehlung zur Sauerstoffabhängigkeit des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes

Die aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass der maximale Explosionsdruck ausschließlich von der Sauerstoffkonzentration im System abhängt. Druck- und Temperaturänderungen des Systems können bei Bedarf über das ideale Gasgesetz als Änderung der Sauerstoffkonzentration ausgedrückt werden. Sinkt die Sauerstoffkonzentration, so nimmt der maximale Explosionsdruck ab. Eine Berechnung des vorliegenden maximalen Explosionsdrucks ist mit der von Eckhoff veröffentlichten Gleichung (21) für Sauerstoffvolumenanteile größer der Sauerstoffgrenzkonzentration des betrachteten Staubes möglich.

Der  $K_{St}$ -Wert weist eine gleichzeitige Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der Sauerstoffkonzentration auf. In ausreichend großer Entfernung von der Sauerstoffgrenzkonzentration ist mit linearem Verlauf des jeweiligen  $K_{St}$ -Wertes bei konstanter Temperatur zu rechnen. Eine Berechnung des benötigten  $K_{St}$ -Wertes kann hier mit der linearen Interpolation berechnet werden. Hierzu werden zwei Messwerte des  $K_{St}$ -Wertes bei konstanter Temperatur und unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen benötigt.

### 6.6.7 Übersicht über die Abhängigkeiten des maximalen Explosionsdrucks und des $K_{St}$ -Wertes von Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration

Nachfolgend in Tabelle 12 aufgeführt ist eine Zusammenfassung der ermittelten Abhängigkeiten des maximalen Explosionsdrucks von den Prozessparametern Druck, Temperatur und Sauerstoffkonzentration. Analog hierzu zeigt Tabelle 13 die Abhängigkeiten des  $K_{St}$ -Wertes. Aufgeführt werden in beiden Tabellen ebenfalls die gültigen Abschätzmethoden mit dazugehörigen Gültigkeitsgrenzen.

Tabelle 12: Verhalten des maximalen Explosionsdrucks gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten des maximalen Explosionsdrucks	Gültige Abschätzung	Gültigkeitsbereich
Druck	$\leq 0,8$ bar abs.	Abnahme	Gleichung (15)	0,5 bar abs. bis 4 bar abs.
	$\geq 1,1$ bar abs.	Zunahme		
Temperatur	$> 25$ °C	Abnahme	Gleichung (17) Gleichung (18)	bis 200 °C
Sauerstoffvolumenanteil	$< 21$ Vol.-%	Abnahme	Gleichung (21)	$y_{O_2} > SGK$
	$> 21$ Vol.-%	Zunahme		

## Kenngrößen aufgewirbelter Stäube – Maximaler Explosionsdruck und $K_{St}$ -Wert

Tabelle 13: Verhalten des  $K_{St}$ -Wertes gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden

Änderung der Prozessbedingung		Verhalten des $K_{St}$ -Wertes	Gültige Abschätzung	Gültigkeitsbereich
<b>Druck</b>	$\leq 0,8$ bar abs.	Abnahme	Gleichung (16)	0,5 bar abs. bis 4 bar abs.
	$\geq 1,1$ bar abs.	Zunahme		
<b>Temperatur</b>	$> 25$ °C	Zunahme für $K_{St}$ $< 100 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$	z. Z. nicht möglich	bis 200 °C
		Abnahme für $K_{St}$ $> 150 \frac{\text{bar}\cdot\text{m}}{\text{s}}$		
<b>Sauerstoffvolumenanteil</b>	$< 21$ Vol.-%	Abnahme	z. Z. nicht möglich	-

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] VDI Richtlinie 2263 Blatt 1, Staubbrände und Staubexplosionen; Gefahren, Beurteilung, Schutzmaßnahmen; Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben, Düsseldorf, 1990.
- [2] ATEX Leitlinien, Leitlinien zur Anwendung der Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen, 4. Ausgabe vom September 2012.
- [3] N. Kuai, J. Li, Z. Chen, W. Huang, J. Yuan und W. Xu, „Experiment-based investigations of magnesium dust explosion characteristics,“ *Journal of Loss Prevention in the process industries*, Nr. 24, pp. 302-313, 2011.
- [4] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.
- [5] DIN EN 50281-2-1, Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub: Teil 2-1: Untersuchungsverfahren - Verfahren zur Bestimmung der Mindestzündtemperatur von Staub, 1999.
- [6] M. Schmidt, *Daten übermittelt via E-Mail am 19. März 2014.*
- [7] DIN EN 15188, Bestimmung des Selbstentzündungsverhaltens von Staubschüttungen, 2007.
- [8] C. D. Walther, „Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf Staubexplosionen und Staubbrände,“ *VDI Berichte*, pp. 195-214, 1988.
- [9] W. Wiemann und E. W. Scholl, „Selbstentzündung von Braunkohlestaub bei vermindertem Sauerstoffgehalt,“ *Staub-Reinhaltung der Luft*, Bd. 45, Nr. 4, pp. 147-150, April 1985.

## Literaturverzeichnis

- [10] M. Schmidt, C. Lohrer und U. Krause, „Einflussgrößen auf die Selbstentzündung von Schüttgütern und Stäuben,“ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin.
- [11] M. Schmidt, M. Malow, Lohrer Christian und U. Krause, „Selbstentzündung von Stäuben bei vermindertem Sauerstoffgehalt,“ *Chemie Ingenieur Technik*, Nr. 74, pp. 1735-1737, Dezember 2002.
- [12] C. Lohrer, M. Schmidt und U. Krause, „Self-ignition of dust at reduced volume fractions of ambient oxygen,“ *Journal of Loss Prevention in the process industries*, Nr. 16, pp. 141-147, 2003.
- [13] C. A. Lohrer, Einflussgrößen auf die Selbstentzündung von Schüttgütern und Stäuben - experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation, Dissertation TU Berlin, 2006.
- [14] C. Lohrer, U. Krause und J. Steinbach, „Self-ignition of combustible bulk materials under various ambient conditions,“ *Process safety and environmental protection*, Nr. 83, pp. 145-150, 2005.
- [15] DIN EN 13821, Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen, 2003.
- [16] T. Glarner, Temperatureinfluss auf das Explosions- und Zündverhalten brennbarer Stäube, Dissertation ETH Zürich, 1983.
- [17] M. Glor und K. Schwenzfeuer, „Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Mindestzündenergie von Stäuben,“ *VDI Berichte*, Nr. 1272, pp. 119-134, 1996.
- [18] T. Glarner, „Mindestzündenergie - Einfluß der Temperatur,“ *VDI Berichte*, Nr. 494, pp. 109-118, 1984.
- [19] S. Radandt, „Mindestzündenergie unter veränderten Einflussgrößen,“ *VDI Berichte*, Nr. 975, pp. 183-205, 1992.
- [20] B. Drechsler, Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit von Klimaparametern, Mannheim: Diplomarbeit, 1991.

## Literaturverzeichnis

- [21] W. Bartknecht und R. Siwek, „Bedeutung von Mindestzündenergie und Zündtemperatur für die Zündwirksamkeit von Zündquellen in Staub/Luft-Gemischen,“ *Staub-Reinhaltung der Luft*, pp. 325-330, 1994.
- [22] Larsen, O., Hagen, J.H., Wingerden, K. van, Eckhoff, R.K., „Ignition of dust clouds by brush discharges in oxygen enriched atmospheres,“ *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, Nr. 5, pp. 85-90, 2001.
- [23] Franke, Abschlußbericht zum Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben "Einfluß des mit zunehmender Teufe steigenden Luftdruckes auf die Entzündbarkeit von Kohlenstäuben und hybriden Gemischen auch bei erhöhten Temperaturen", Dortmund, 1987.
- [24] D. R. Ballal, „Ignition and flame quenching of quiescent dust clouds of solid fuels,“ *Proceedings of the royal society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Nr. 1739, pp. 479-500, 1980.
- [25] DIN EN 14034-3:2006, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 3: Bestimmung der unteren Explosionsgrenze UEG von Staub/Luft-Gemischen, 2006.
- [26] W. Wiemann, Untersuchung des Explosionsverhaltens von Methan und Kohlenstaub bei hohen Temperaturen unter verminderten Sauerstoffgehalt, Dortmund: Westfälische Berggewerkschaftskasse, 1987.
- [27] W. Wiemann, „Vermeidung von Staubexplosionen durch Inertisieren,“ *VDI Berichte*, Nr. 701, pp. 491-510, 1988.
- [28] W. Wiemann, „Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air and dust/air/inert gas mixture,“ *Industrial dust explosion*, pp. 10-13, 1986.
- [29] W. Wiemann, Einfluss der Temperatur auf die Sauerstoffgrenzkonzentration bei der Inertisierung, Bericht über das 9. internationale Kolloquium über die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, Luzern, 1984.
- [30] W. Wiemann, Inertisierung, Westfälische Berggewerkschaftskasse Bergbau-Versuchsstrecke.



## Literaturverzeichnis

- [31] W. Wiemann, „Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffkonzentrationen,“ *VDI Berichte*, Nr. 494, pp. 89-97, 1984.
- [32] DIN EN 51720, Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen, 2001.
- [33] K. L. Cashdollar, „Overview of dust explosibility characteristics“.
- [34] K. L. Cashdollar, „Coal dust explosibility,“ *Journal of Loss Prevention in the Process industries*, Nr. 1, pp. 65-76, 1996.
- [35] M. Hertzberg, K. L. Cashdollar und I. A. Zlochower, „Flammability limit measurements for dusts and gases: ignition energy requirements and pressure dependences,“ *Twenty-first Symposium on combustion institute*, pp. 303-313, 1986.
- [36] R. Pilao, E. Ramalho und C. Pinho, „Influence of initial pressure on the explosibility of cork dust/air mixtures,“ *Journal of Loss Prevention in the process industries*, Nr. 17, pp. 87-96, 2004.
- [37] R. Pilao, E. Ramalho und C. Pinho, „Overall characterization of cork dust explosion,“ *Journal of hazardous materials*, Nr. B133, pp. 183-195, 2006.
- [38] DIN EN 14034-4, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 4: Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration SGK von Staub/Luft-Gemischen, 2004.
- [39] W. Wiemann, „Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffkonzentrationen,“ *VDI Berichte*, Nr. 494, pp. 89-97, 1984.
- [40] W. Wiemann, „Inertisierung von Gasen und Stäuben gegen Explosionen in Behältern und Rohrleitungen,“ *Moderne Unfallverhütung*, Nr. 29, pp. 29-37, 1985.
- [41] W. Wiemann und E. W. Scholl, „The influence of temperature on the explosion characteristics and the neutralization of coal dust/air mixtures,“ *Proceedings of the 21st international conference of safety in mine research institutes*, 1985.

## Literaturverzeichnis

- [42] DIN EN 14034-1, „Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 1: Bestimmung des maximalen Explosionsdruckes  $p_{max}$  Staub/Luft-Gemischen,“ 2004.
- [43] DIN EN 14034-2, Bestimmung der Explosionskenngrößen von Staub/Luft-Gemischen - Teil 2: Bestimmung des maximalen zeitlichen Druckanstiegs  $(dp/dt)_{max}$  von Staub/Luft-Gemischen, 2011.
- [44] E. C. Lazaro und J. G. Torrent, „Experimental research on explosibility at high initial pressures of combustible dusts,“ *Journal of loss prevention in the process industries*, Nr. 13, pp. 221-228, 2000.
- [45] T. Horstmann, F. Wischniewski, B. Maurer und W. Leuckel, „Entzündungsverhalten von Brennstoff/Luft-Gemischen im Unterdruck,“ *VDI Berichte*, Nr. 1272, pp. 149-159, 1996.
- [46] M. Mittal, „Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety,“ *Journal of loss prevention in the process industries*, Nr. 26, pp. 1106-1112, 2013.
- [47] R. K. Eckhoff, „Partial inerting - an additional degree of freedom in dust explosion protection,“ *Journal of loss prevention in the process industries*, Nr. 17, pp. 197-193, 2003.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsergebnisse von Walther .....	12
Abbildung 2: Maximale Temperaturdifferenz zwischen Proben- und Ofentemperatur in den Untersuchungen von Walther.....	12
Abbildung 3: Versuchsergebnisse von Wiemann und Scholl sowie von Lohrer und Schmidt.....	14
Abbildung 4: Versuchsergebnisse von Glarner über das Verhalten der Mindestzündenergie unter sauerstoffreduzierten Atmosphären.....	20
Abbildung 5: Berechnung der Mindestzündenergie nach Gleichung (1) für technische Stäube mit Mindestzündenergien bei atmosphärischen Bedingungen von $> 1 \text{ mJ}$ .....	21
Abbildung 6: Ausgewählte Versuchsergebnisse von Glarner über das Verhalten der Mindestzündenergie bei erhöhten Umgebungstemperaturen.....	22
Abbildung 7: Vergleich von mit Gleichung (2) berechneten Mindestzündenergien mit von Glarner experimentell ermittelten .....	23
Abbildung 8: Vergleich von berechneten Werten nach der Methode von Bartknecht und Siwek mit von Glarner ermittelten Mindestzündenergien .....	24
Abbildung 9: Schematische Darstellung der von Ballal genutzten Versuchsanordnung.....	26
Abbildung 10: Vergleich von mit Gleichung (7) berechneten unteren Explosionsgrenzen und experimentell ermittelten.....	31
Abbildung 11: Vergleich von experimentellen Daten mit den berechneten Werten der unteren Explosionsgrenze gemäß der Burghess-Wheeler Gleichung .....	31
Abbildung 12: Versuchsergebnisse von Wiemann, Cashdollar und Pilao .....	32
Abbildung 13: Vergleich von experimentellen Daten mit den berechneten Werten der Sauerstoffgrenzkonzentration gemäß Gleichung (12).....	36
Abbildung 14: Versuchsergebnisse von Wiemann und Walther .....	37
Abbildung 15: Versuchsergebnisse von Glarner, Pilao, Kuai, Horstmann, Wiemann und Lazaro.....	39
Abbildung 16: Vergleich von berechneten maximalen Explosionsdrücken gemäß Gleichung (15) mit veröffentlichten Messergebnissen von Wiemann und Kuai .....	40
Abbildung 17: Vergleich von mit Gleichung (16) berechneten $K_{St}$ -Werten mit von Wiemann und Glarner experimentell ermittelten.....	41

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 18: Versuchsergebnisse von Wiemann und Glarner für den Einfluss erhöhter Umgebungstemperaturen auf den maximalen Explosionsdruck .....	42
Abbildung 19: Vergleich von mit den Gleichungen (17) und (18) berechneten maximalen Explosionsdrücken mit von Wiemann und Glarner experimentell ermittelten Werten .....	43
Abbildung 20: Von Wiemann experimentell ermittelte $K_{St}$ -Wert verschiedener organischer Stäube bei unterschiedlichen Temperaturen .....	43
Abbildung 21: Verhalten des maximalen Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration für verschiedene Umgebungstemperaturen .....	45
Abbildung 22: Vergleich berechneter maximaler Explosionsdrücke mit von Glarner experimentell ermittelten Werten .....	46
Abbildung 23: Vergleich von mit Gleichung (21) berechneten maximalen Explosionsdrücken mit experimentellen Werten .....	46

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht des tendenziellen Verhaltens der betrachteten Kenngrößen.....	2
Tabelle 2: Forschungsbedarf: geringer experimenteller Aufwand.....	3
Tabelle 3: Verhalten der Brennzahl gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden.....	8
Tabelle 4: Verhalten der Glimmtemperatur gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden.....	10
Tabelle 5: Verhalten der Selbstentzündungstemperatur gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden .....	16
Tabelle 6: Verhalten der Zündtemperatur gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden.....	18
Tabelle 7: Verhalten der Mindestzündenergie gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden .....	27
Tabelle 8: Von Wiemann [26] ermittelte Werte von $\alpha$ .....	30
Tabelle 9: Verhalten der unteren Explosionsgrenze gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden .....	33
Tabelle 10: Von Wiemann [26] ermittelte Werte von $\beta$ für eine Inertisierung mit Stickstoff .....	35
Tabelle 11: Verhalten der Sauerstoffgrenzkonzentration gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden .....	38
Tabelle 12: Verhalten des maximalen Explosionsdrucks gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden .....	48
Tabelle 13: Verhalten des $K_{St}$ -Wertes gegenüber nicht-atmosphärischen Bedingungen und gültige Abschätzmethoden.....	49

## 10 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
abs.	absolut
MZE	Mindestzündenergie
SGK	Sauerstoffgrenzkonzentration
UEG	Untere Explosionsgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Griechisches Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\Delta$	Differenz	[-]
$\alpha$	Koeffizient für die Berechnung der unteren Explosionsgrenze	$\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}\right]$
$\beta$	Koeffizient für die Berechnung der Sauerstoffgrenzkonzentration	$\left[\frac{\text{Vol. -\%}}{\text{K}}\right]$

Lateinisches Symbol	Bezeichnung	Einheit
a, b	Koeffizienten für Berechnung der Mindestzündenergie	[-]
c	Konzentration	[mol/m <sup>3</sup> ]
d	Durchmesser	[mm]
E <sub>A</sub>	Aktivierungsenergie	[J/mol]
F <sub>waf</sub>	Anteil flüchtiger Bestandteile im Staub	[g/m <sup>3</sup> ]
K, n, u, z,	Koeffizienten für die Berechnung des maximalen Explosionsdrucks und des K <sub>ST</sub> -Werts	[-]
p	Druck	[bar]
R	Ideale Gaskonstante	$\left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right]$
T	Temperatur	[°C] oder [K]
y	Volumenanteil	[Vol.-%]

Index	Bedeutung
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
Fakt	Faktor
0, 1	Ausgangswerte
x	Beschreibung eines Zustands, an welchem keine Explosion mehr möglich ist