

Stephan Huschka, Denkendorf

**Modellierung eines
Materialgesetzes
zur Beschreibung
der mechanischen
Eigenschaften von
Aluminiumschaum**

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe Nr. **525**

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	VIII
Indizes	XII
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung und Lösungsweg	3
2.1 Präzisierung der Aufgabenstellung.....	3
2.2 Lösungsweg.....	3
3. Stand der Forschung.....	4
3.1 Herstellverfahren poröser Metalle	4
3.1.1 Schmelzmetallurgie	5
3.1.1.1 Schäumen aus der Schmelze.....	5
3.1.1.2 Gießen mit verlorener Form.....	6
3.1.1.3 Verwendung von Platzhaltermaterialien.....	7
3.1.1.4 Übersättigung der Schmelze mit Gas.....	9
3.1.2 Pulvermetallurgie	10
3.1.2.1 Verpressen von Metallpulvern mit Treibmittel.....	10
3.1.2.2 Schäumen von Schlickern aus Metallpulver.....	11
3.1.2.3 Sinterverfahren.....	11
3.1.3 Oberflächentechnologie.....	12
3.1.3.1 Spritzen von Metall und Treibmittel.....	12
3.1.3.2 Sputtern in Inertgas-Atmosphäre	13
3.1.4 Zusammenfassung der Herstellverfahren	13
3.2 Modellierung der Struktur und der mechanischen Eigenschaften.....	15
3.2.1 Modelle zur Beschreibung der Porenstruktur.....	15
3.2.1.1 Das Porenmodell von Gibson und Ashby	17
3.2.1.2 Das Porenmodell von Menges und Knipschild.....	18
3.2.1.3 Das Porenmodell von Zhang.....	19
3.2.1.4 Das Porenmodell von Gent und Thomas	20
3.2.1.5 Das Porenmodell von Ko	20
3.2.1.6 Das Porenmodell von Lederman.....	21
3.2.1.7 Das Porenmodell von MacKenzie	22
3.2.2 Modellierung des elastischen Werkstoffverhaltens.....	22
3.2.2.1 Das Elastizitätsmodell von Gibson und Ashby.....	22
3.2.2.2 Das Elastizitätsmodell von Menges und Knipschild	23
3.2.2.3 Das Elastizitätsmodell von Zhang	24
3.2.2.4 Das Elastizitätsmodell von Gent und Thomas	24
3.2.2.5 Das Elastizitätsmodell von Ko.....	25
3.2.2.6 Das Elastizitätsmodell von Lederman	26
3.2.2.7 Das Elastizitätsmodell von MacKenzie	26
3.2.3 Festigkeitsmodelle.....	27

3.2.3.1	Das Festigkeitsmodell von Gibson und Ashby	27
3.2.3.1.1	Duktileres Festigkeitsverhalten.....	27
3.2.3.1.2	Sprödes Festigkeitsverhalten	28
3.2.3.2	Das Festigkeitsmodell von Zhang.....	28
3.2.4	Modellierung der Spannungs-Stauchungskurven.....	29
3.2.4.1	Das Verformungsmodell von Gibson und Ashby.....	30
3.2.4.1.1	Duktile Schäume.....	30
3.2.4.1.2	Spröde Schäume	33
3.2.4.2	Das Verformungsmodell von Zhang.....	33
3.3	Diskussion der bekannten Modellierungen	34
3.3.1	Diskussion der Porenmodelle.....	34
3.3.2	Diskussion der Elastizitätsmodelle.....	35
3.3.3	Diskussion der Festigkeitsmodelle.....	37
3.3.4	Diskussion der Modelle der Spannungs-Stauchungskurve	38
4.	Versuchsdurchführung	40
4.1	Werkstoffe.....	40
4.1.1	Mechanische Eigenschaften der Grundwerkstoffe	41
4.2	Versuchseinrichtungen und Untersuchungsmethoden	43
4.2.1	Druckversuch.....	43
4.2.2	Crashversuch	44
4.2.3	Zugversuch	44
4.2.4	Schubversuch.....	45
4.2.5	Strukturbewertung mittels digitaler Bildanalyse.....	46
5.	Ergebnisse	48
5.1	Charakteristika der Stauchungskurven.....	48
5.1.1	Verformungsverhalten bei Stauchung.....	48
5.1.2	Der pseudo-lineare Spannungsanstieg.....	51
5.1.3	Der Bereich der Verdichtung.....	52
5.1.4	Der Bereich der Endverdichtung	53
5.2	Druckfestigkeit	55
5.3	Zugfestigkeit.....	58
5.4	Schubfestigkeit	60
5.5	Druckdeformationsmodul.....	61
5.6	Zugdeformationsmodul	63
5.7	Schubdeformationsmodul.....	63
5.8	Energieabsorption.....	64
5.9	Struktureller Aufbau der Schäume	66
5.9.1	Porendurchmesser	66
5.9.2	Zellwand- und Stegdicken.....	69
6.	Modellierung der Materialeigenschaften	70
6.1	Das Porenmodell	70
6.1.1	Geschlossenporiger Tetrakaidekaeder.....	72
6.1.2	Offenporiger Tetrakaidekaeder	75

6.1.3 Geschlossenporiger Tetraikaedraeder mit dünnen Zellwänden.....	77
6.2 Die linear elastischen Eigenschaften	81
6.2.1 Deformationsmodul für offenporige Schäume bei Druckbelastung.....	81
6.2.2 Deformationsmodul für geschlossenporige Schäume bei Druckbelastung	87
6.2.3 Deformationsmodul für offenporige Schäume bei Schubbelastung.....	89
6.2.4 Deformationsmodul für geschlossenporige Schäume bei Schubbelastung	90
6.3 Die Festigkeitseigenschaften	90
6.3.1 Druckfestigkeit	90
6.3.2 Druckfestigkeit geschlossenporiger Schäume.....	92
6.3.3 Zugfestigkeit.....	93
6.3.4 Schubfestigkeit offen- und geschlossenporiger Schäume	94
6.4 Die Spannungs-Stauchungskurven.....	94
6.4.1 Modellierung mit vereinfachten Annahmen.....	95
6.4.2 Modellierung unter Berücksichtigung der Porengrößenverteilung	97
6.4.2.1 Der pseudo-lineare Spannungsanstieg	99
6.4.2.2 Der Bereich der Verdichtung	101
6.4.2.3 Der Bereich der Endverdichtung	102
7. Diskussion der Ergebnisse	104
7.1 Diskussion der abgeleiteten Porenmodelle.....	104
7.2 Diskussion des Elastizitätsmodells.....	106
7.2.1 Modellierung des Druckdeformationsmodul.....	106
7.2.2 Modellierung des Zugdeformationsmodul	111
7.2.3 Modellierung des Schubdeformationsmodul.....	112
7.3 Diskussion der Modellierung der Festigkeiten.....	114
7.3.1 Modellierung der Druckfestigkeit	114
7.3.2 Modellierung der Zugfestigkeit.....	117
7.3.3 Modellierung der Schubfestigkeit	118
7.4 Diskussion der Modellierung der Spannungs-Stauchungskurven.....	120
7.4.1 Modellierung unter Verwendung vereinfachter Annahmen.....	120
7.4.2 Modellierung unter Verwendung der Porengrößenverteilung.....	122
8. Potentielle Anwendungsgebiete für Aluminiumschaum.....	129
8.1 Aluminiumschaum als Energieabsorber	129
8.2 Aluminiumschaum als Schallabsorber	132
8.3 Aluminiumschaum als Isolationsmaterial	132
8.4 Aluminiumschaum als Wärmetauscher	133
8.5 Aluminiumschaum als Konstruktionsmaterial	133
8.6 Aluminiumschaum als elektromagnetische Abschirmung	134
9. Zusammenfassung und Ausblick	135
10. Literatur.....	138