

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	1
1 EIN ÜBERBLICK ÜBER DEN STAND DER FORSCHUNG	7
1.1 Simulationsmethoden	8
1.2 Rheologie von Schüttgütern	13
1.2.1 Kurzes Auffrischen der Kontinuumsmechanik	13
1.2.2 Scheren einer newtonischen Flüssigkeit	14
1.2.3 Scherzustände	18
1.2.4 Typische Geometrien	19
1.2.5 Scherzonen und Scherzonenbreiten	20
1.2.6 Das Prinzip der minimalen Dissipation	24
1.2.7 Konstitutive Beziehungen	25
1.2.8 Nichtlokale Agitationen	28
1.2.9 Dynamik auf einer Landschaft aus Spannungszuständen	31
2 PRÄPARATION DES SYSTEMS	37
2.1 Simulationsaufbau	37
2.1.1 Geometrie und mikroskopische Parameter	37
2.1.2 Natürliche Einheiten	39
2.1.3 Iterationszahl und Zeitschrittenanpassung	40
2.1.4 Die Vorbereitung der Packung	42
3 PRIMÄRMESSUNGEN	45
3.1 Vorüberlegungen anhand makroskopischer Größen	46
3.1.1 Schwerpunktsgeschwindigkeit	46

3.1.2	Scherzellenvolumen	47
3.1.3	Kräfte und Spannungen an den Wänden	48
3.1.4	Erste Zusammenfassung	50
3.2	Mesoskopische Felder auf einem Gitter	51
3.2.1	Nutzung der Geometrie	51
3.2.2	Mittelung der Größen	52
4	COARSE-GRAINING AN WÄNDEN	57
4.1	CG-Theorie ohne Ränder	58
4.1.1	Mikroskopische Felder	60
4.1.2	Von Mikro zu Makro	62
4.1.3	Massenerhaltung	64
4.1.4	Impulserhaltung	65
4.1.5	Drehimpulserhaltung	69
4.1.6	Erhaltungssätze im Gleichgewicht	70
4.2	Komplikationen durch Wände	71
4.2.1	Einbruch der Messgrößen	71
4.2.2	Kontakte mit der Wand	72
4.2.3	Kommutation	73
4.3	Bewertung der CG-Korrekturschemata	74
4.4	Korrekturschemata	75
4.4.1	Der Ansatz der Renormalisierung	75
4.4.2	Virtuelle Systeme	76
4.4.3	Das (über-)große Teilchen	79
4.4.4	Die Überschussmethode	82
4.5	Anwendung der Schemata	84
4.5.1	Anwendung auf das Testsystem	84
4.5.2	Vergleich der Korrekturansätze anhand der Ergebnisse im Testsystem	88
4.6	Schlussfolgerungen	94
5	STATIONÄRE FELDER	99
5.1	Das Spannungsfeld	102
5.1.1	Ein Blick zu 2D	102
5.1.2	Typische Spannungssprofile	103
5.1.3	Der kinetische Beitrag zum Spannungsfeld	105
5.1.4	Das Spannungsfeld als Funktion der Wandgeschwindigkeit	107
5.2	Das Geschwindigkeitsfeld	108
5.2.1	Ein Blick zu 2D	109
5.2.2	Typische Geschwindigkeitsprofile	110

5.2.3	Die Geschwindigkeitsfelder als Funktion der Wandgeschwindigkeit	112
5.3	Packungsdichte	116
5.3.1	Ein Blick zu 2D	116
5.3.2	Typische Dichteprofile	116
5.3.3	Das Dichtefeld als Funktion der Wandgeschwindigkeit	120
5.4	Zusammenfassung	120
6	VORHERSAGEN DURCH DIE NICHT-LOKALE THEORIE	123
6.1	Das Fitten typischer Geschwindigkeitsprofile	124
6.2	Die Störung als Funktion der Wandgeschwindigkeit	126
6.3	Zusammenfassung und Interpretation	129
7	KONSTITUTIVE GESETZE UND KRITISCHE GESCHWINDIGKEITEN	131
7.0.1	Ein Blick zu 2D	131
7.1	Die Hauptmasse	132
7.1.1	Das Dilatanz- und das Reibungsgesetz	133
7.1.2	Die Normaldrücke	135
7.1.3	Die Winkelgeschwindigkeit	136
7.2	Die Sonderrolle der Grenzschicht	137
7.2.1	Von Kontakten und Kollisionen	137
7.2.2	Scherung und Scherspannung	140
7.3	Von der Wand ins Volumen	143
7.3.1	Ortsabhängige Scherraten und Winkelgeschwindigkeiten	144
7.3.2	Ortsabhängige Packungsdichte	145
7.3.3	Ortsabhängige Normaldrücke	148
7.4	Die Übergänge zwischen den Zuständen	151
7.4.1	Von der Brechung der Symmetrie und dem Wachstum der Scherzonen	151
7.4.2	Vom Block zum Fließen	157
7.5	Zusammenfassung	158
8	DER EINFLUSS DER MIKROSKOPISCHEN REIBUNG UND DER SYSTEMGRÖSSE	163
8.0.1	Ein Blick zu 2D	164
8.1	Der Einfluss der mikroskopischen Reibungskoeffizienten	165
8.1.1	Das Abgleiten der Wände ohne Scherung	165
8.1.2	Wandreibung	169
8.1.3	Teilchenreibung	171
8.2	Der Einfluss der Systemgröße	174
8.2.1	Im System mit verkeilter Hauptmasse	175

8.2.2	Im System mit fließender Hauptmasse	175
8.2.3	Zusammenfassung	180
9	ZEITABHÄNGIGE FELDER	185
9.1	Zeitabhängige Felder: Ein Überblick	185
9.1.1	Transienten in Wandnähe	186
9.1.2	Transienten in der Hauptmasse	187
9.2	Der fließende Block	189
9.3	Zusammenfassung	194
10	LOGARITHMISCH LANGSAMES VERDICHTEN	195
10.1	Phänomenologischer Ansatz	196
10.2	Heuristisches Modell	200
10.3	Zusammenfassung	204
11	BESTÄNDIGE RELATIONEN UND DIFFUSIVE SCHERRATEN	205
11.1	Mittelung über die Hauptmasse	206
11.2	Die Relaxationszeit	208
11.3	Lokal oder nicht?	211
11.4	Zusammenfassung	215
FAZIT UND AUSBLICK		217
A	ANHANG	223
A.1	Recheneffizienz	223
A.1.1	Ausnutzung der Translationssymmetrie	223
A.1.2	Cut-Off	223
A.2	Spiegelung an Ecken und Bögen	224
A.2.1	Ecken	224
A.2.2	Bögen	225
A.3	Mikroskopische Geometrien	226
A.3.1	Die Geschwindigkeit eines haftenden Randteilchens	226
A.3.2	Drehung eines Volumenelements	228