

Jens Mischner, Thomas Juch, Klaus Kurth

Flüssiggasanlagen

Entwurf, Planung und Optimierung



Verlag für Bauwesen · Berlin

Inhaltsverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. Jens Mischner

1	Flüssiggase und ihre Eigenschaften	15
1.1	Flüssiggase	15
1.1.1	Grundlagen	15
1.1.2	Zusammensetzung von Flüssiggasen	16
1.1.3	Gütwerte von Flüssiggasen	18
1.1.4	Struktur der Kohlenwasserstoffe	18
1.2	Grundbegriffe. Allgemeine Konstanten und Gesetzmäßigkeiten	19
1.2.1	Einführung	19
1.2.2	Begriffe	20
1.2.3	Mischungen. Masse-, Raum- und Stoffmengenanteile. Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	25
1.2.4	Thermisches Zustandsverhalten realer Fluide. Gasgesetze	30
1.2.5	Energetisches Zustandsverhalten von Fluiden	43
1.2.6	Phasengleichgewicht von Flüssigkeitsgemischen	44
1.3	Stoffwerte von Flüssiggasen	50
1.3.1	Kritische Daten	50
1.3.2	Molare Masse und Gaskonstante	50
1.3.3	Realgasverhalten	51
1.3.4	Dichte, Dichteverhältnis, spezifisches Volumen	58
1.3.5	Ausdehnungskoeffizienten	64
1.3.6	Viskosität	69
1.3.7	Spezifische Wärmekapazität	76
1.3.8	Wärmeleitfähigkeit. Temperaturleitfähigkeit	82
1.3.9	<i>Prandtl</i> -Zahl	85
1.3.10	Dampfdruck	85
1.3.11	Verdampfungsenthalpie	90
1.3.12	Siedepunkt und Taupunkt von Flüssiggasen	92
1.3.13	Gleichgewichtswert	95
1.3.14	Energetische Zustandsdiagramme	98
1.3.15	Diffusionskoeffizient	98
1.3.16	Oberflächenspannung	103
1.3.17	Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten	105
1.3.18	Gasfeuchte	106
1.3.19	Hydratbildung	109
1.3.20	<i>Joule-Thomson</i> -Effekt	118
1.3.21	Schallgeschwindigkeit	120

1.4	Ausgewählte thermodynamische Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten für binäre Gemische bei Verdampfungs- und Entnahmevorgängen	120
1.4.1	Gaszusammensetzung	120
1.4.2	Gleichgewichtsverdampfung	120
1.4.3	Änderung der Zusammensetzung eines Flüssiggases bei Entnahme aus der Gasphase eines Behälters	130
1.4.4	Minimale Endmasse im Behälter	132
1.5	Brenntechnische Kennwerte	133
1.5.1	Heizwert, Brennwert, <i>Wobbe</i> -Zahl	133
1.5.2	Luftbedarf zur Verbrennung	134
1.5.3	Verbrennungsgasmenge	137
1.5.4	Zusammensetzung der Verbrennungsgase	139
1.5.5	Verbrennungstemperatur	140
1.6	Sicherheitstechnische Kennwerte	142
1.6.1	Zündbereitschaft, Zündfähigkeit	142
1.6.1.1	Zündgrenzen, Explosionsgrenzen	142
1.6.1.2	Stöchiometrisches Gemisch	146
1.6.1.3	Minimaler explosionsgefährlicher Sauerstoffgehalt	147
1.6.1.4	Phlegmatisierende Mindestkonzentration	147
1.6.1.5	Zündtemperatur	148
1.6.1.6	Mindestzündenergie	148
1.6.2	Brennbarkeit, Explosionsfähigkeit	149
1.6.2.1	Allgemeines	149
1.6.2.2	Grenzspaltweite	150
1.6.3	Ablauf von Zündvorgängen und Explosionen	150
1.6.3.1	Allgemeines	150
1.6.3.2	Sauerstoffäquivalent	151
1.6.3.3	Flammengeschwindigkeit	152
1.6.4	Begleiterscheinungen von Bränden und Explosionen	154
1.6.4.1	Allgemeines	154
1.6.4.2	Explosionengeschwindigkeit	155
1.6.4.3	Explosionsdruck	155
1.6.4.4	Brisanz, Explosionskonstante	157
1.7	Spezielle Kennwerte	159
1.7.1	Brechungsindex	159
1.7.2	Dielektrizitätskonstante	159
1.8	Energiewirtschaftliche Charakteristika	160
1.8.1	Randbedingungen	160
1.8.2	Energiewandlungskette	161
1.8.	Emissionsbewertung. THG-Emissionen	161

Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Kurth

2	Lagerung, Beförderung und Umfüllen von Flüssiggas.	165
2.1	Grundsätzliches	165
2.2	Lagerung von Flüssiggas	165
2.2.1	Allgemeines, Begriffe	165
2.2.2	Flüssiggasbehälter	167

2.2.2.1	Druckgasbehälter	167
2.2.2.2	Druckbehälter	171
2.2.3	Aufstellung von Flüssiggasbehältern	175
2.2.3.1	Lagern von Druckgasbehältern	175
2.2.3.2	Lagern von Flüssiggas in Druckbehältern	179
2.3	Beförderung von Flüssiggas	206
2.3.1	Begriffe, Arten	206
2.3.2	Transport von Flüssiggas in Flaschen	211
2.3.3	Transport von Flüssiggas in Straßentankwagen, Eisenbahnkesselwagen bzw. Tankschiffen	228
2.4	Umfüllen von Flüssiggas	228
2.4.1	Begriffe, Arten	228
2.4.2	Füllanlagen zum Abfüllen von Flüssiggasen aus Druckgasbehältern in Druckbehälter	230
2.4.3	Füllanlagen zum Abfüllen von Flüssiggas aus Druckbehältern in Druckgasbehälter	232
2.4.4	Füllanlagen zum Abfüllen von Flüssiggas aus Druckgasbehältern in Druckgasbehälter	245

Dr.-Ing. Thomas Juch

3	Gasbereitstellung aus Flüssiggaslagerbehältern	249
3.1	Arten der Gasbereitstellung aus Flüssiggaslagerbehältern	249
3.2	Gasbereitstellung aus Flüssiggaslagerbehältern ohne Hilfsenergie	251
3.2.1	Grundlagen der Berechnung von Entnahmevorgängen ohne Hilfsenergie	251
3.2.1.1	Begriffsbestimmung	251
3.2.1.2	Thermodynamisches Modell	252
3.2.1.3	Randbedingungen für die Berechnung von Entnahmevorgängen	254
3.2.2	Die Berechnung der Entnahmeleistung von Flüssiggaslagerbehältern	257
3.2.2.1	Beschreibung des Entnahmevorgangs und Prozesse bei der Entnahme	257
3.2.2.2	Berechnungsverfahren für ununterbrochene Entnahme aus Flüssiggaslagerbehältern	261
3.2.2.3	Modell zur unterbrochenen Entnahme aus Flüssiggaslagerbehältern	274
3.2.2.4	Berechnungsverfahren	275
3.2.3	Die Entnahmeleistung von Flüssiggaslagerbehältern und Flüssiggasflaschen	276
3.2.3.1	Bemessungsparameter, Auslegungsbedingungen	276
3.2.3.2	Gasleistungsfähigkeit oberirdisch aufgestellter Flüssiggaslagerbehälter	278
3.2.3.3	Gasleistungsfähigkeit erdreichengebetteter Flüssiggaslagerbehälter	279
3.2.3.4	Gasleistungsfähigkeit erdreichabgedeckter Flüssiggaslagerbehälter	279
3.2.3.5	Gasleistungsfähigkeit halb erdreichengebetteter Flüssiggaslagerbehälter	281
3.2.3.6	Gasleistungsfähigkeit von Behälterbatterien	282
3.2.3.7	Gasleistungsfähigkeit von Flüssiggasflaschen	284
3.2.4	Einfluß ausgewählter Parameter auf die Entnahmeleistung von Flüssiggaslagerbehältern	285
3.2.4.1	Entnahmedauer und Entnahmeregime	285
3.2.4.2	Füllfaktor	287
3.2.4.3	Zusammensetzung des Flüssiggases	287
3.2.4.4	Gegendruck der zu versorgenden Anlage	289

3.2.4.5	Anfangstemperaturverhältnisse in der Behälterumgebung	289
3.2.4.6	Einbettungsverhältnisse erdgedeckter Flüssiggaslagerbehälter	290
3.2.4.7	Stoffwerte des Erdreiches	291
3.2.4.8	Zusammenfassung	293
3.3	Gasbereitstellung aus Flüssiggaslagerbehältern mit Hilfsenergie	299
3.3.1	Verdampfer für die Flüssiggasbereitstellung	299
3.3.2	Grundzüge der Bemessung und Auswahl von Verdampferanlagen	300

Prof. Dr.-Ing. Jens Mischner

4	Rohrleitungen	301
4.1	Grundsätzliches	301
4.2	Begriffe, Definitionen	301
4.3	Rohrleitungen und Armaturen	305
4.3.1	Überblick	305
4.3.2	Armaturen	305
4.3.3	Absperrarmaturen. Kugelhähne	312
4.3.4	Überströmventile	315
4.3.5	Rückschlagventile	315
4.3.6	Rohrbruchventile	315
4.3.7	Füllventile	317
4.3.8	Schmutzfänger	318
4.3.9	Sicherheitsabsperrventile	319
4.3.10	Sicherheitsabblaseventile	321
4.3.11	Schnellschlußarmaturen	323
4.3.12	Rohrleitungen	325
4.4	Flüssiggasverdampfer	328
4.4.1	Bauarten. Klassifizierung	328
4.4.2	Aufstellung und Betrieb von Flüssiggasverdampfern	343
4.5	Druckregler	346
4.6	Flüssiggaspumpen. Kompressoren	356
4.6.1	Flüssiggaspumpen	356
4.6.1.1	Allgemeines	356
4.6.1.2	Bauarten von Flüssiggaspumpen	356
4.6.1.3	Anlageneinbindung	361
4.6.1.4	Besonderheiten bei der Förderung von Flüssigkeits-Gas-Gemischen	364
4.6.1.5	Ausrüstung und Aufstellung von Pumpen in Flüssiggasanlagen	365
4.6.2	Kompressoren	365
4.6.2.1	Allgemeines	365
4.6.2.2	Bauarten von Flüssiggaskompressoren	365
4.6.2.3	Ausrüstung und Aufstellung von Kompressoren in Flüssiggasanlagen	369
4.7	Sonstige Bauteile für Flüssiggasanlagen	370
4.7.1	Isolierflansche	370
4.7.2	Flüssigkeitsabscheider	370

4.7.3	Druckbegrenzer	370
4.7.4	Überfüllsicherung	373
4.7.5	Schlauchanschlüsse, Schlauchabreißkupplung	375
4.7.6	Methanol – Füllereinrichtung	376
4.8	Bemessung von Rohrleitungen in Flüssiggasanlagen	377
4.8.1	Grundlagen der Druckverlustberechnung	377
4.8.2	Gebrauchsgleichungen für Niederdruck – Flüssiggasleitungen	383
4.8.3	Bemessung von Flüssigphaseleitungen	387

Dr.-Ing. Thomas Juch

5	Gestaltung von Flüssiggasanlagen	391
5.1	Grundsätzliches	391
5.2	Flüssiggasversorgungsanlagen	391
5.2.1	Anlagen mit Flüssiggasflaschen	391
5.2.1.1	Flüssiggasflaschen	391
5.2.1.2	Flüssiggasversorgungsanlagen mit Flüssiggasflaschen	393
5.2.2	Anlagen mit Flüssiggaslagerbehältern	396
5.2.2.1	Flüssiggaslagerbehälter	396
5.2.2.2	Flüssiggasversorgungsanlagen mit Flüssiggaslagerbehältern	400
5.2.3	Anlagen mit Flüssiggasverdampfern	411
5.2.3.1	Arten von Verdampfern	411
5.2.3.2	Anforderungen bei der Aufstellung von Verdampfern	414

Prof. Dr.-Ing. Jens Mischner

6	Bewertung von Flüssiggasanlagen	417
6.1	Technische und sicherheitstechnische Bewertung von Flüssiggasanlagen	417
6.1.1	Grundsätzliches	417
6.1.2	Gesetzliche Grundlagen, Technisches Regelwerk	417
6.1.3	Prüfung von Flüssiggasanlagen	420
6.2	Sicherheitstechnische Betrachtungen	424
6.2.1	Einführung	424
6.2.2	Sicherheitsrelevante Kenndaten von Flüssiggasen	424
6.2.3	Austritt von Flüssiggasen beim Anlagenbetrieb sowie Entleerungs- und Entspannungsvorgängen	425
6.2.3.1	Grundsätzliches	425
6.2.3.2	Abschätzung der Leckverluste bei normalem Anlagenbetrieb	426
6.2.3.3	Gasfreisetzung aus Flüssiggasanlagen	426
6.2.3.4	Gaswolken	430
6.2.3.5	Brandwirkungen	434
6.2.3.6	Ausbreitungsrechnung	434
6.2.3.7	Sicherheitsabstand	447
6.2.4	Risikoanalysen	456

Anhang	457
Stoffdaten ausgewählter Flüssiggase bei Sättigung (Tabellen A 1.1 bis A 1.9)	458
Sicherheitsdatenblatt Propan	463
Sicherheitsdatenblatt Butan.	469
Arbeitsblätter zur Ermittlung des Entnahmemassestroms.	475
Literaturverzeichnis	481
Sachwortverzeichnis	501