

= 206 mm,  $l = 103$  mm; beim Gabelzapfen nach (98)  $d = 0,46 \sqrt{100000}$   
 = 145 mm,  $l$  ebensogross; beim beiderseits 8theiligen Lamellengelenk  
 $d = 0,35 \cdot 145 = 51$  mm, Gesamtlänge =  $2 \cdot 8 \cdot 51 = 816$  mm. Nehmen  
 wir nun beim Halbzapfen für dieselbe Aufgabe  $d = 51$ , so wird  $l$  nur  $51 \cdot 8$   
 = 408 mm. Wir können aber auch  $d = 40$  nehmen. Dann kommt  $l$   
 =  $408 \cdot 51 : 40 = 520$  mm. Die Zapfenreibung wird nun:  $\sim \frac{1}{5}$  derjeni-  
 gen beim Stirnzapfen,  $\frac{8}{29}$  derjenigen beim Gabelzapfen,  $\frac{4}{5}$  derjenigen beim  
 8theiligen Lamellengelenk, welches letztere gegen 60 Prozent mehr Längen-  
 ausdehnung beansprucht hat.

Eine Anwendung des Halbzapfens siehe unten bei der Kupp-  
 lung von Fossey. Woolf wandte den Halbzapfen bei dem guss-  
 eisernen Querhaupt der Kolbenstange einer grossen Wasserhal-  
 tungsmaschine an \*).

Die äusserste Durchführung des Halbzapfenprinzips behufs  
 Verminderung der Reibung ist bei den Schneiden der Waagebal-  
 ken zu finden. Die Flächenpressung auf die durch leichtes Ab-  
 schleifen zu Cylindersektoren gestalteten Zapfenflächen findet sich  
 sehr hoch, von 10 bis gegen 100 kg pro qmm. Die Härte der  
 Stahlschneiden und ihrer Lager scheint so hohe Pressungen ohne  
 wesentlichen Nachtheil zu gestatten \*\*).

## §. 96.

### Reibung der Tragzapfen.

Neue Zapfen reiben sich stärker als gut eingelaufene. Wäh-  
 rend nämlich bei ersteren der Flächendruck zwischen Zapfen und  
 Hülse unabhängig von der Lage des Berührungspunktes und gleich  
 dem Druck auf die Einheit der Projektion der Auflagefläche ist,  
 bewirkt das Einlaufen die in §. 90 erwähnte, den Mittelwerth  
 von  $p$  herabziehende Druckvertheilung \*\*\*). Beim Durchmesser  $d$

\*) Siehe Tredgold, Cornish Pumping Engine.

\*\*) Bei grossen Brückenwagen findet man Pressungen bis zu 160 kg  
 pro Millimeter der Länge der Schneide, was bei  $\frac{1}{2}$  mm Auflagenbreite einem  
 Flächendruck von über 300 kg entspricht. Es werden daselbst aber auch  
 starke Einpressungen und Abnutzungen beobachtet. Die Schneiden des  
 Messapparates an der grossen Werder'schen Festigkeitsversuchsmaschine  
 der kgl. Gewerbe-Akademie haben 360 mm Länge und erfahren einen  
 Maximaldruck von 100000 kg, d. i. 277,8 kg pro Längeneinheit, oder bei  
 $\frac{1}{2}$  mm Auflagenbreite 556,6 kg pro Quadratmillimeter. Einpressungen die-  
 ser Schneiden haben aber stattgefunden und scheinen auch unvermeidlich  
 zu sein.

\*\*\*) Vergl. Reye, z. Theorie der Zapfenreibung, Civ.-Ing. VI (1860),  
 S. 235, sowie Grove, Berechn. d. Trag- u. Stützzapfen, Mitth. d. Gew.-  
 Vereins für Hannover 1876, Heft 6.

und der Belastung  $P$  eines cylindrischen Tragzapfens, für dessen Reibung der Koeffizient  $f$  gilt, beträgt die Umfangskraft  $F$ , welche der Reibung das Gleichgewicht hält,

beim neuen, d. i. nicht eingelaufenen Zapfen:

$$F = \frac{\pi}{2} f P \dots \dots \dots (99)$$

und beim eingelaufenen Zapfen:

$$F = \frac{4}{\pi} f P \dots \dots \dots (100)$$

Das Einlaufen zieht also die Reibung auf das  $8:\pi^2$ fache oder  $\sim 0,81$ fache herab. Die wirkliche Grösse von  $F$  ist aber noch bedingt durch den Werth von  $f$ . Dieser ist nicht, wie die Morin-Coulomb'sche Theorie angibt, nur vom Oelungs- und Oberflächenzustand, sondern auch vom Flächendruck  $p$  und der Gleitungsgeschwindigkeit  $v$  abhängig\*). Immer fehlt es noch an völlig ausreichenden Versuchen\*\*).

\*) Vergl. Hirn, Études sur les frottements médiats, Bulletin von Mülhausen 1854, S. 188, sodann die Versuche von Rennie, Sella, Bochet u. A.

\*\*\*) Engineer, 1873, Nov., S. 312, bringt eine kleine aber lehrreiche Versuchsreihe, angestellt an Zapfen von Eisenbahnachsen im normalen Betrieb. Man änderte die Zapfenabmessungen und damit den Flächendruck unter Belassung der übrigen Verhältnisse. Lagerschalen aus demselben Tiegel gegossen, 7 Kupfer und 1 Zinn enth., Achsen Schmiedeeisen. Nach durchlaufenen 45 000 km hatte verloren

	der Zapfen	die Schale
1) bei $d = 83$ , $l = 140$ an Durchm.	0,8 mm	an Gewicht 2,27 kg
2) " " 89 " 145 " "	0,4 " "	" " 1,36 "
3) " " 95 " 178 " "	0,254 " "	" " 1,135 "

Unter Voraussetzung von 5000 kg Zapfenbelastung ermittelt sich  $p$  in den drei Fällen zu bezw. 0,43, 0,39 und 0,30 kg. Der Vergleich der Erfolge in Bezug auf die Abnutzung ergibt nun Folgendes:

$p$ wurde herabgemindert im Verhältniss von . . . . .	10 : 9,1 : 7,0
der Bronzeverlust	gieng herab im Verh. von 10 : 5,98 : 5,43
der Eisenverlust	" " " " " 10 : 5,55 : 2,31
der Gesamtverlust	" " " " " 10 : 5,9 : 4,3
Eisenverlust gegen Bronzeverlust	" " " " " 1:2,1 : 1:3 : 1:5
während die Geschwindigkeit stieg	" " " " " 10 : 10,7 : 11,4

Nach der älteren Theorie hätte wegen der Zunahme der Gleitungsgeschwindigkeit eine Steigerung der Abnutzung eintreten müssen, während eine Verminderung auf 43 Proz. stattfand. Aus dem Angeführten geht hervor, dass die Einführung von  $p = a : n$  die verwickelten thatsächlichen Verhältnisse zwar keineswegs genau ausdrückt, dass sie aber doch geeignet ist, wenigstens einigermaassen den wesentlichen Einflüssen Rechnung zu tragen.

Rennie fand für (Guss-) Eisen auf Bronze bei voller Oelung:

wenn $p = 0,023$	0,123	0,222	0,346	0,470	0,520
$f = 0,157$	0,225	0,215	0,222	0,234	0,234

$v$  wurde von Rennie nicht berücksichtigt. Hirn fand bei  $v = 1,7$  m für Gusseisen auf Bronze bei voller Oelung:

wenn $p = 0,0021$	0,0037	0,0053	0,0069	0,0085
$f = 0,0376$	0,0211	0,0226	0,0199	0,0183

also  $f$  abnehmend bei wachsendem  $p$ , notabene, wenn dieses sehr klein. Ausserdem fand er, wenn  $p$  konstant und  $= 0,0085$ :

wenn $v = 0,467$	0,832	0,934	0,400	1,663	1,700	1,866
$f = 0,0086$	0,0121	0,0128	0,0165	0,0181	0,0183	0,0191,

abermals sehr kleine, mit  $v$  allerdings beträchtlich wachsende Werthe. Bei Morin's Versuchen lag  $p$  zwischen 0,0096 und 0,0137 (14 bis 20 Pfd. pro □ Zoll). Die von ihm für geölte Zapfen gegebenen Werthe liegen bekanntlich zwischen 0,05 und 0,11, bei Schmierung mit Fett zwischen 0,08 und 0,15 bis 0,16.

In der kgl. Gewerbe-Akademie wurde durch Versuche mit dem Clair'schen Apparat, welcher für die Morin'schen Versuche eingerichtet ist, u. a. Folgendes gefunden. Schmiedeiserne Gleitstücke auf Messingschienen, reichliche Oelung.

	Erste Versuchsreihe	Zweite Versuchsreihe
Reibungsfläche . . . . .	12 800 qmm	128 qmm
Druck $P$ auf dieselbe . . . . .	16,5 kg	16,5 kg
mithin $p$ . . . . .	0,00129 "	0,129 "
Beobachtete Reibung . . . . .	1,25 "	2,65 "
also Koeffizient $f$ . . . . .	0,076	0,160

Versuche mit einem vom Verfasser konstruirten Apparat nach Art eines Prony'schen Zaumes ergaben bei  $v = 0,15$  bis 0,18 für Schmiedeisen auf Bronze bei guter Oelung:

wenn $p = 0,035$	0,086	0,135	0,236	0,340	0,439	0,500
$f = 0,090$	0,087	0,095	0,118	0,171	0,184	0,180

Hier steigt  $f$  auf das Doppelte, wenn  $p$  von  $\sim \frac{1}{30}$  auf  $\frac{1}{2}$  gesteigert wird. Wenn  $p$  konstant und  $= 0,33$ , so ergab sich

für $v = 0,004$	0,072	0,176	0,280	0,280
$f = 0,222$	0,210	0,191	0,167	0,185

Hier nehmen die Reibungskoeffizienten ab bei zunehmendem  $v$ , entgegen den oben vorgeführten Hirn'schen Beobachtungen,  $p$  ist aber gegen 40mal so gross, als bei Hirn. Diese Ergebnisse entsprechen den Resultaten Morin's in sofern, als dieser nachgewiesen, dass die Reibung des Bewegungsbeginnes (Reibung der Ruhe) durchweg grösser sei, als die Reibung der Bewegung, was sich auch dahin deuten lässt, dass bei kleinem  $v$  die Reibung grösser ist als bei grossem. Dieses Gesetz scheint aber nur bis zu einer Grenze für  $v$  zu gelten, jenseits welcher  $f$  bei wachsendem  $v$  wieder zunimmt. Hirn's Versuche lägen demnach jenseits dieser Grenze. Die vom Verfasser angestellten Versuche sind erst die Anfänge einer grösseren Beobachtungsreihe.

Hinsichtlich der wirklichen Abnutzung der Lager von Eisenbahnachsen liegen so ausreichende Beobachtungen, wie zu wünschen wäre, nicht vor, indessen gibt folgende Zusammenstellung einen gewissen Anhalt\*).

Nr.	Lagermetall	1 kg Lagermetall an 4 Lagern läuft	4 Lager verlieren auf 1000 km	1 kg Lagermetall hat den Marktpreis	4 Lager Kosten an Metall auf 1000 km
		km	g	M.	§
1	Rothguss 83 Ku 17 Zinn . . .	90 390	11,06	2,66	2,93
2	Desgl. 82 Ku 18 Zinn . . .	99 900	10,01	2,61	2,61
3	Weissmetall 3 Ku 90 Zinn 7 Ant.	72 280	13,83	2,99	4,14
4	Desgl. 5 Ku 85 Zinn 10 Ant.	88 145	11,34	2,93	3,32
5	Hartblei 84 Blei 16 Ant. . . . .	81 280	12,30	1,19	1,46
6	Phosphorbronze . . . . .	429 200	2,33	3,50	0,82
7	Parson's Weissbronze . . . . .	385 275	2,60	1,99	0,52
8	Dewrance's Babbitmetall . . .	637 679	1,57	2,34	0,37

Hieraus lassen sich für einen grossen Wagenpark bemerkenswerthe Schlüsse ziehen. Soll dies aber versucht werden, so ist zunächst zu beachten, dass an den Zapfen und Lagern der Bremswagen die Abnutzung sich  $4\frac{1}{2}$ - bis 10mal so stark zeigt, als an anderen Wagen. Es durchläuft nun in Preussen 1 Achse im Jahr

an Personenwagen . . .  $\sim$  35 000 km

an Güterwagen . . .  $\sim$  15 000 „

Zahlen, welche mit den in anderen Ländern beobachteten nahe übereinstimmen, somit zur Zeit eine ziemlich allgemeine Gültigkeit besitzen.

Führt man nunmehr die gebremsten Achsen mit der 6fachen Abnutzung der gewöhnlichen Achsen ein, so erhält man für Preussen für den Stand von 1877 (unter Reduktion der Achsen auf volle Jahresleistung) Folgendes:

\*) Nr. 1 bis 6 nach Dr. Künzel's sehr lehrreichem Werke über Bronzelegirungen, Dresden 1875; Nr. 7 und 8 nach Engineer 1876, Bd. 41, S. 4 und 31, wobei Reduktion auf gleiche Grundannahmen stattgefunden und deshalb nicht so übertrieben günstige Zahlen gesetzt sind, wie Engineer sie findet.

Personenwagenachsen . . .	24 472 St. durchliefen	1000e Jahreskilometer
Gepäckwagenachsen . . . .	6 642 "	
Für 11 319 gebremste Achsen		
das 5 fache hinzu . . . .	56 595 "	
	<hr/>	
	87 709 St. ( $\times 35$ ) . . . . .	3 069 815
Güterwagen, verschiedene,		
Arbeitswagen etc. . . . .	284 776 "	
Für 81 781 gebremste Achsen		
das 5 fache hinzu . . . . .	408 905 "	
	<hr/>	
	693 681 St. ( $\times 15$ ) . . . . .	10 405 215
		<hr/>
	Zusammen	13 475 030

d. h. es sind 6 732 515 mal 1000 Jahreskilometer für je 4 Lager in Ansatz zu bringen. Hiernach würden die jährlichen Kosten für Lagermetall (die Umschmelzung ausser Rechnung gelassen) betragen:

bei dem Einheitspreis Nr. 8 . . .	$\sim$	24 910 <i>Mk.</i>
" " " Nr. 6 . . . . .		55 207 "
" " " Nr. 3 . . . . .		278 726 "

Dies ergibt einen beträchtlichen Spielraum für die Kosten für Lagermetall, je nachdem die eine oder andere Lagerkomposition benutzt wird. Sollte man, wie Manche thun, annehmen müssen, dass der Menge des abgenutzten Metalls der Oelverbrauch und zugleich der Reibungsbetrag proportional zu setzen sei, so würde nach Spalte 3 bei Nr. 8 und Nr. 3 der Kraftverbrauch für die Zapfenreibung zwischen dem 1. und dem 8,8fachen eines Minimalwerthes schwanken; Rothguss würde gegen Phosphorbronze stehen wie 11,06 : 2,33, d. i. wie  $\sim$  4,7 : 1.

## B. Stützzapfen.

### §. 97.

### Berechnung der Spurzapfen.

Ein Stützzapfen, welcher am Ende einer Welle oder Achse angebracht ist, und auf seiner Grundfläche den Längendruck derselben aufzunehmen hat, heisst ein Fuss- oder Spurzapfen. Es ist zweckmässig, ihn für gewöhnliche Fälle mit cylindrischer Mantel- und ebener Grundfläche auszuführen, siehe Fig. 281. Der Flächendruck auf die Zapfensohle ist bei neuen Zapfen gleich-