

Analys av Hubers rangeringsystemAllmänt

För den tekniska beskrivningen av Hubers system och speciellt försöksanläggningen i Basel - Muttenz hänvisas till följande tryckta skrifter:

J Huber: "Elektrodynamische Kraftwirkungen an einem auf Eisenbahnschienen beweglichen Radsatz", E.u.M. Heft 8, 1959.

J Huber und A Egloff: "Vorschlag zur automatischen Geschwindigkeitssteuerung ablaufender Wagen in Rangierbahnhöfen", Rangiertechnik, Heft 22, 1962.

För allmän teori rörande elektrodynamiska förhållanden i rörliga ledare hänvisas dessutom till:

J Huber: "Zur Dynamik bewegter Leiter", Technische Rundschau, Nr 23, 1966.

I det följande lämnas en ytterst kortfattad teori för uppkomsten av elektrodynamiska krafter i järnvägshjul vid rörelse i magnetfält härrörande från elektrisk ström i rälerna. Framställningen är i huvudsak kvalitativ, men det må anföras att författaren har genomfört ganska mödosamma numeriska beräkningar för uppskattning av de verkliga beloppen av de under aktuella praktiska förhållanden uppträdande krafterna. På grund av de komplicerade geometriska betingelserna samt osäkerheten ifråga om materialens elektriska och magnetiska egenskaper äro dessa beräkningar ytterst osäkra. Storleksordningen har dock visat sig stämma förhållandevis väl med vad som uppmätts av Huber, och detsamma gäller om formen för krafternas beroende av rullningshastighet och rörelseriktning. Den detaljerade matematiska behandlingen återges emellertid ej i denna redogörelse.

I samband med erinran om att Hubers system innefattar såväl en bromsnings- som en pådrivningsanordning, vilka arbeta med olika utrustning och i princip helt oberoende av varandra, må följande påpekas:

Bromsningen är baserad på ström i skenorna, vilken ej passerar hjul och hjulaxlar och som sålunda elektrodynamiskt påverkar hjulen via inducerade virvelströmmar samt i någon ringa mån via friktionskrafter från rörliga bromslistor. Pådrivningen däremot arbetar med ström som till- och frånledes genom

rälerna och sålunda passerar genom rullningskontaktpunkter, hjul och hjulaxlar. Den elektrodynamiska verkan på hjulparen beror sålunda i huvudsak på direkt samspel mellan å ena sidan fält från ström i rälerna och å den andra strömmar i hjulsatsen, givetvis under stark medverkan av utpräglad, av rörelsen samt den koncentrerade strömövergången betingad, strömförträngning.

Den vid bromsning uppträdande kraften innebär knappast någon överraskning vid tillämpning av enkel teori, men ifråga om pådrivningen gäller, att såväl det funktionella beroendet av rullningshastigheten som själva storleksordningen av de uppträdande krafterna vålla vissa svårigheter vid den teoretiska förklaringen.

Följande starkt förenklade resonemang kan ge en aning om att just i omedelbar närhet av kontaktpunkten intressanta förlopp utspelas, vilka ge upphov till betydande krafter.

Antag sålunda, att en oändligt tunn ledande ring berör, i vila eller rullning, en oändligt tunn rak ledare samt att i den sistnämnda en elektrisk ström ensidigt tillföres ringen för att sedan på i och för sig ointressant sätt fortsätta genom en till ringen kopplad axel. Anordningen visas i figur 1.

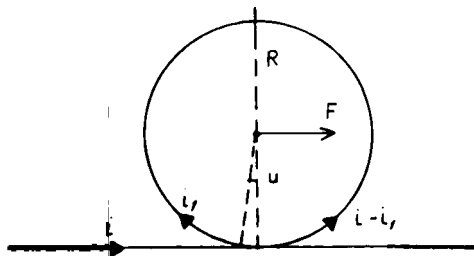


Fig 1

Den på vänster sida om kontaktpunkten verkande horisontalkraften med vinkeln u mycket liten, är:

$$F = \frac{\mu_0 I I_1}{2\pi} \int_0^u \frac{\sin \nu d\nu}{1 - \cos \nu} = \frac{\mu_0 I I_1}{2\pi} \ln \frac{1 - \cos u}{1 - \cos 0} = \infty$$

Den motriktade kraften på höger sida är mycket mindre.

Detta enkla resonemang avviker givetvis mycket från vad som kan väntas i ett praktiskt fall. Det visar emellertid att, i den mån strömmarna genom rådande förhållanden i ett verkligt hjul tvingas ut till ytan med hög strömtäthet därstädes, förvånande stora krafter kunna uppstå, med säte just inom ett trångt område intill kontaktpunkten. Ett av syftena med den senare i denna framställning relaterade undersökningen är just att studera huruvida och i vad mån en sådan strömförträngning uppträder och på vad sätt den beror av rullningens riktning och hastighet.

Elementära elektrodynamiska regler och deras tillämpning vid järnvägshjul

Antag en kropp av ledande material, som befinner sig i rörelse med den vektoriella hastigheten v relativt ett magnetfält med täthetsvektorn B . Den inom kroppen inducerade elektriska fältstyrkan ges då av vektorprodukten:

$$E = v \times B$$

Om i materialet flyter en ström I , så är den elektrodynamiska kraften per volymsenhet:

$$F = I \times B$$

Låt ρ vara materialets resistivitet och antag att strömmen framdrives av den av rörelsen i magnetfältet inducerade emk, dvs

$$I = \frac{1}{\rho} E$$

så erhålles kraften i formen:

$$F = \frac{1}{\rho} E \times B = \frac{1}{\rho} (v \times B) \times B = \frac{1}{\rho} [(B \cdot v) B - B^2 v]$$

Vid tillämpning på järnvägshjul kan man som en nödvändig och tillåten förenkling anta, att man arbetar i ett vertikaltplan innehållande räil och hjul. Den från strömmen i räilen härrörande vektorn B är då vinkelrät mot detta plan, medan hastighetsvektorn v ligger i planet. Den skalära produkten $B \cdot v$ är då lika med noll, och kraften blir:

$$F = -\frac{1}{\rho} B^2 v$$

I det följande studeras några enkla fall.

Antag först enligt fig 2, att ström flyter enbart i rälén, åt höger, samt att hjulet rullar åt höger.

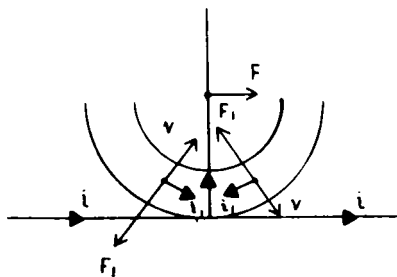


Fig 2

Kraften blir sålunda bromsande
(virvelströmsbromsning)

Fig 3 visar ett fall med hjulet i vila och utsatt för ensidig strömmatning från rälén upp till hjulaxeln.

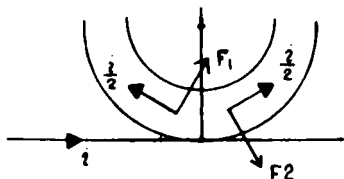


Fig 3

Här verka de båda antydda kraftvektorerna i samma riktning. På vänster sida är emellertid B större än till höger, varför $F_1 > F_2$. Hjulet påverkas av kraft åt höger, alltså i riktning från strömkällan.

Antag sedan enligt fig 4, att hjulet befinner sig i rullning åt höger och samtidigt påverkas av ensidigt från vänster inmatad ström.

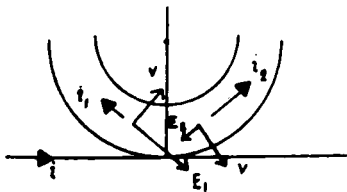


Fig 4

Den av rörelsen i magnetfältet orsakade elektriska fältstyrkan E är givetvis större på vänster än på höger sida, vilket medför att den i fig 3 visade symmetriska strömfördelningen förvanskas genom överlagring av en i hjulkransen moturs oirkulerande ström. Denna ger tydligen en bromsande verkan, alltså motsatt den vilokraft som omnämndes i samband med fig 3.

Slutligen studeras enligt fig 5 inverkan av transformatoriskt alstrad kortslutningsström vid fall av växelström och med samma ensidiga typ av strömmatning som förut antagits.

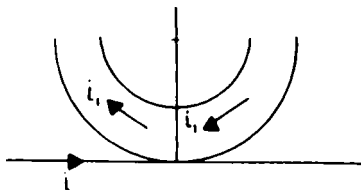


Fig 5

Denna ström kan uppfattas som en i hjulkransen cirkulerande ström, vars kraftalstrande komponent är motriktad den fältalstrande rälströmmen inom området nära kontaktpunkten. Den härav på hjulet verkande kraften är riktad åt höger, dvs drivande i den förut antagna rullningsriktningen.

I den nu lämnade korta översikten över elementärt härledda krafter ha vissa kvantitativt sett ytterst viktiga fenomen helt lämnats ur räkningen, nämligen vad som inträffar i omedelbart grannskap av kontaktpunkten, alltså inom vad som kan benämnas "kommuteringsområdet". Dessa förhållanden beröras längre fram i samband med redogörelsen för pådrivningsanordningens verkningssätt.

Bromsanordningen enligt Huber

Utrymmet tillåter ingen redogörelse för konstruktion, utförande, elektronisk styrning m m, utan härvidlag hänvisas till de inledningsvis givna tryckta skrifterna.

Vad beträffar det teoretiska verkningssättet så framgår detta fullt klart av vad som ovan sagts i anslutning till fig 2. En teoretisk beräkning har visat tämligen god överensstämmelse mellan framräknade värden och enligt Huber uppmätta krafter.

Här må endast omnämnas några personliga intryck, som författaren erhöll vid besök, tillsammans med Dr Huber, vid försöksanläggningen i Basel - Muttenz, den 17 april 1967. Härvid anges bl a några klart iakttagbara fördelar hos den ifrågavarande bromsanordningen i jämförelse med mekaniska dylika, nämligen:

1:0 Reglerbarhet med möjlighet till smidigt arbetande automatisering. Demonstration med såväl tomma som lastade vagnar visade en mjuk bromsning, som effektivt reglerades i funktion av vagnhastigheten genom inkoppling av strömmen ett lämpligt tidsintervall innan vagnen skulle lämna bromssträckan.

2:o Tystgång. Skillnaden mot den i hög grad bullrande sk "Talbremse" av rent mekanisk typ, som användes omedelbart nedanför "vallen", var synnerligen markant.

3:o Frihet från lyftning av hjulen vid utgången från bromssträckan. Vid den mekaniska bromsen inträffade ofta en bullrande och för ömtålig last skadlig lyftning och återfall. Den magnetiska attraktionen förhindrar detta fenomen vid den elektrodynamiska, på virvelströmsbildning baserade bromsen.

Beträffande Dr Hubers "Richtungsgleisbremse" må dessutom följande nämnas:

Försök med fettsmorda bromslistor hade visat, att den rena virvelströmsbromskraften utgjorde 80 - 95 % av den totala kraften, medan återstoden utgjordes av friktionskraft. Variationsområdet betingas av olika väderleksförhållanden.

Enär bromsanordningen arbetar med likström - försök med växelström hade ej gjorts - erfordras likriktare på högströmssidan av transformatorerna. Varje transformator har normalt en märkeffekt av 400 kVA enfas vid omsättningen $500/8$ V, $16\frac{2}{3}$ Hz. Den är utförd med ringkärna och ett enda sekundärvarv. Sekundärlindningen är härvid uppdelad i ett antal parallella dellindningar, var och en med sin egen selenlikriktare.

Strömledaren i bromssträckan är utförd av aluminium.

Ingen risk för isbildning i bromssträckan föreligger, åtminstone ej i Basel- klimatet. Detta beror främst på den ofta återkommande uppvärmingen genom strömbelastning. Man avser att ersätta den för närvarande mekaniska "Talbremse" med en elektromekanisk dylik. Reglerutrustningen för bromsen kommer att kompletteras med ytterligare detaljer.

Pådrivningsanordningen enligt Huber

Även ifråga om denna hänvisas till de inledningsvis omnämnda publikationerna.

Innan vissa personliga intryck, från det nyss angivna besöket i Basel - Muttenz, redovisas, må ett avsnitt ägnas åt den teoretiska bakgrunden till anordningens i vissa avseenden gynnsamma egenskaper. Det må härvid redan från början anföras, att riktigheten hos de framförda fysikaliska förklaringarna

knappast kan betvivlas, men att så många och stora osäkerhetsfaktorer inkomma i det numeriska underlaget för beräkningarna, att överensstämmelse mellan teori och praktik ej kan förväntas annat än ifråga om storleksordningen av krafterna, den ungefärliga formen hos kraft- hastighetskurvan etc. Med denna utgångspunkt kan den erhållna överensstämmelsen med de av Dr Huber uppmätta krafterna också betecknas som tillfredsställande.

Den allmänna formen för pådrivningskraften som funktion av rullningshastigheten vid given ström är enligt Dr Hubers mätningar den i fig 6 visade.

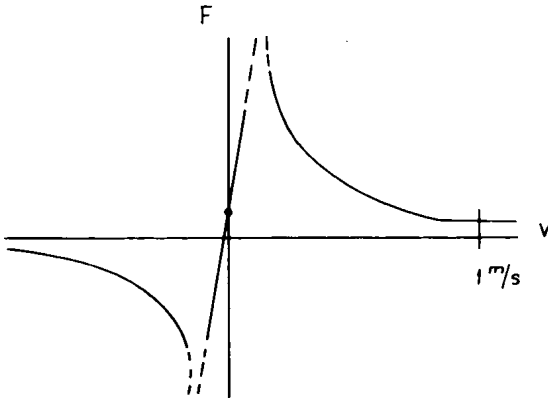


Fig 6

Kraften har sålunda ett utpräglat och till sitt belopp svårbestämt maximum - positivt respektive negativt - vid mycket låg hastighet.

På positiva sidan är, för given hastighet, kraftens absoluta belopp något större än på den negativa sidan, vilket i och för sig kan lätt förklaras med hjälp av den i anslutning till fig 3 angivna vilokraften. Det är ju självfallet, att härvid med positiv rörelseriktning menas rörelse från strömkällan och med positiv kraft en pådrivning i nämnda riktning.

Om man med utgångspunkt i figurerna 3 - 5 och fortfarande med antagande av konstant ström i rälen, uppritar kraften som funktion av hastigheten, så får man kurvorna enligt fig 7.

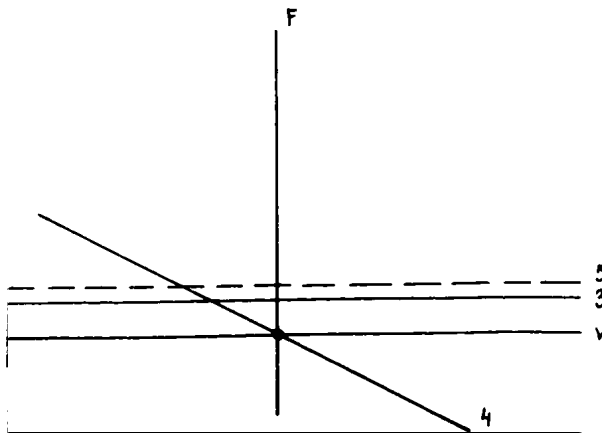


Fig 7

Kurvan 3 är vilokraften. Kurvan 5 hänför sig enbart till fallet växelström. Lutningen hos kurvan 4 beror givetvis av den cirkulerande strömens tillväxt med den av hastigheten i magnetfältet beroende emk.

Resultanten av kurvorna i fig 7 saknar givetvis varje överensstämmelse med erfarenhetskurvan enligt fig 6. Här måste ytterligare en term tillkomma, och denna beror givetvis av de speciella förhållandena inom kommuteringsområdet.

I anslutning till fig 8 kan följande tankegång följas.

Anläggningen mellan räl och hjul är praktiskt taget punktformig eller utgör en kort tunn linje tvärs över rälen. Strömmens rumsförlopp inom hjulet in- till kontaktpunkten kan åskådliggöras genom en "kvast" av strömvektorer

enligt figuren. Intill punkten är strömtätheten oerhörd hög. Om hjulet rullar åt höger närmar sig "kvasten" till punkten b och avlägsnar sig från a. I dessa punkter uppstå därigenom inducerade E- vektorer, såsom visas i figuren. Dessa

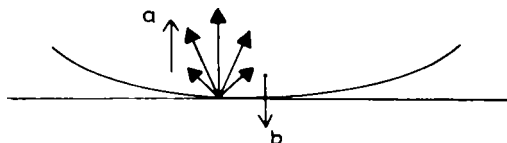


Fig 8

ge upphov till medurs flytande kortslutningsströmmar, vilka intill kontaktpunkten flyta åt vänster och torde besitta en synnerligen hög strömtäthet i själva ytan. Samtidigt "suges", såsom lätt kan visas, strömmen i rälen upp mot ytan. Följden blir, att tillståndet i kommuteringsområdet kommer att närma sig till det idealtillstånd som tidigare betraktades vid fig 1, och pådrivningskraften blir betydande, alltid i den momentana rullningsrörelsens riktning, även när rullning sker mot strömkällan.

Frågan är nu hur hastighetsberoendet kan förutses. En teoretisk beräkning, som givetvis varit ganska mödosam och behäftad med betydande osäkerhet, har givit vid handen, att induktansen hos den nyssnämnda kortslutningskretsen medför, för given ström i rälen, ett asymptotiskt närmande av kortslutningsströmmen till ett gränsvärde vid ökande hastighet. Vidare åstadkommer samma induktans genom fördröjning en förskjutning av kortslutningsströmmens maximi- punkt från kontaktpunkten, vilket givetvis ger en minskning av kraftverkan.

De genomförda beräkningarna ge storleksordningsmässigt den sammanställning av de olika kraftkomponenterna enligt figurerna 3, 4 och 8, som visas i fig 9.

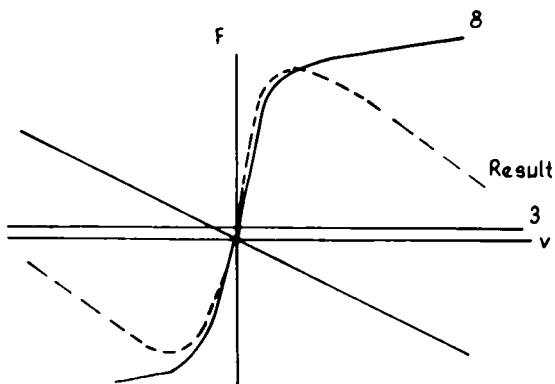


Fig 9

Överensstämmelsen i form med de uppmätta kurvorna enligt Huber är iögonenfallande, och även storleksordningen stämmer. Den stora branthet närmast utanför maximum, som Huber funnit, har dock ej kunnat med de primitiva räknemetoderna påvisas.

Vid växelström lyftes kurvan något enligt fig 5, men samtidigt har man vid beräkningen haft att ta hänsyn till vissa virvelströmsfenomen, som verkat i negativ riktning. En positiv faktor synes dock samtidigt ha inkommit i samband med påvisandet av lokala kortslutningskretsar inom själva hjulkranen, vilka pressat ut strömmen mot ytan. Detta är av praktiskt intresse, enär det sannolikt bidragit till att Huber kunnat utföra den kommersiella pådrivningsanordningen för växelström, vilket är ekonomiskt gynnsamt.

I vad mån mättningsfenomen uppträda och kraftverkan sålunda vid ökad ström växer långsammare än med strömmens kvadrat, har ej kunnat matematiskt utredas. Hubers mätningar antyda att så är i någon mån fallet. En ström av storleksordningen 50 kA är måhända ett rimligt övre gränsvärde för ekonomisk dimensionering.

Följande tabell kan ge en ungefärlig uppfattning om beräknad och uppmätt pådrivningskraft, den senare erhållen medelst omräkning av Hubers kurvor. Tabellvärdena hänföra sig till likström 50 kVA och kraften, uttryckt i kN, till ett hjulpar. Hastigheten anges i m/s och gäller rullning i riktning från strömkällan.

Kraft

<u>v</u>	<u>Beräknad</u>	<u>Mätt enl Huber</u>
0	1,2	
0,05	13	15
0,1	8	10
0,2	6	6
0,5	3,5	2,5

Huruvida denna storleksordning hos erhållna krafter är tillfyllest för praktisk tillämpning på bangårdar med normala lutningsförhållanden bör bli föremål för undersökning.

Efter denna summariska redogörelse för ett studium av pådrivningsanordningens fysikaliska bakgrund må vissa personliga erfarenheter och intryck från det tidigare nämnda besöket i Basel - Muttenz anges.

Demonstrationen av bromsning enligt ovan av tomma och lastade vagnar i kombination med omedelbart efter utträdet ur bromsen inträffande pådrivning visade goda resultat. Det var i viss mån fascinerande att iakttaga hur vagnen nedbromsades från en betydande hastighet - betydligt över en meter per sekund - till en mycket låg utgångshastighet, så att man rent intuitivt väntade sig ett stopp inom de närmaste sekunderna. Något sådant inträffade emellertid ej, utan vagnen fortsatte att rulla och detta med en fullt iakttagbar acceleration. Högre hastighet uppnåddes dock ej än vad som i regel kan accepteras för ofarlig stöt mot stillastående vagnar. Den erhållna hastigheten är givetvis starkt beroende av eventuell lutning hos spåret. Risk för helstopp föreligger dock i regel ej, detta beroende på den egendomliga och gynnsamma hyperbelartade formen hos kurvan för kraftens beroende av hastigheten, med högt toppvärde vid mycket låg hastighet.

Vid ett tillfälle inträffade det missödet, att en vagn stannade på grund av att bromsbackarna magnetiserats och lågo an mot hjulkransen. Detta uppgavs vara ett ibland återkommande och rätt förargligt fel, vilket kräver noggrann tillsyn av backarnas återföringsanordning. Att utföra backarna av omagnetiskt material skulle vara en effektiv och lämplig ehuru något kostsam åtgärd.

Pådrivningsanordningen arbetar med växelström av rent ekonomiska orsaker. Transformatorerna ha i stort sett samma data som vid bromsen, men när likriktare ej erfordras utgöres sekundärlindningen nu av en enda grov stav av aluminium. Transformatorns hölje, vilket ävenledes är av aluminium, utgör ena polen av sekundärkretsen och är sålunda direkt förbundet med tilledningarna till den ena skenan. Tilledningarna till de båda skenorna äro i s k pannkaksutförande anordnade tätt tillsammans, för minsta möjliga reaktans, med placering mitt emellan skenorna och med avgreningar till dessa på var fjärde meter, allt i aluminium. Transformatorerna äro placerade i gropar på ett inbördes avstånd av 45 m.

Ingen sektionering av spåret i isolerade partier förekommer. Regleringen är såtillvida enklare än vad som angivits i den nämnda skriften, som strömstyrkereglering helt slopats och ersatts av tidsstyrning med automatisk inkoppling av respektive transformator under 40 - 60 sekunder.

Det stora antalet transformatorer och den komplicerade och materialkrävande anordningen för strömtillförsel till skenorna gör att anläggningskostnaden för pådrivanordningen är av samma storleksordning som för bromsen, trots att den sistnämnda är principiellt och mekaniskt väsentligt mera komplicerad. Kostnaden för pådrivningsanordningen i Basel - Muttenz uppskattades till storleksordningen 300 000 francs per spår.

Vi diskuterade ekonomiska aspekter på den elektrodynamiskt styrda växlingen jämförd med klassiska metoder. Att den förstnämnda innebär stora fördelar ifråga om tyst drift, snabbare arbete samt personalbesparing ligger i öppen dag. Min fråga angående besparing med avseende på minskade skador på transporterat gods besvarades med hänvisning till en tysk statistiker, som räknat ut att "varje hörbar stöt kostar 100 DM". Begreppet "hörbar" torde dock vara tämligen vagt.

Stockholm den 23 januari 1970

E. Fredriksson