SCIENTIFIC PAPERS
OF THE UNIVERSITY OF PARDUBICE
Series B
The Jan Perner Transport Faculty
5 (1999)

VÝZNAM EXPERIMENTŮ PŘI STUDIU PŘÍČIN POŠKOZOVÁNÍ JÍZDNÍ PLOCHY ŽELEZNIČNÍCH KOL

Rudolf KALOČ [1)], Jaroslav JANDA [2)]

[1)] Katedra provozní spolehlivosti, diagnostiky a mechaniky v dopravě
[2)] Katedra dopravních prostředků

1. Úvod

V současné době bylo metodami materiálového výzkumu prokazatelně zjištěno, že v povrchových vrstvách jízdní plochy železničních kol, brzděných kotoučovými brzdami, dochází k transformaci původní feriticko-perlitické mikrostruktury na mikrostrukturu martenzitickou, resp. bainitickou. Tento úkaz je nepřímým důkazem vzniku teplot nad teplotu přeměny A_3. Podle [1] zmíněné oblasti, jejichž mikrotvrdosti podle Hannemanna dosahují hodnot 900÷1400 Hvm, zasahují do hloubek až 0,9 mm a vyskytují se na různých místech jízdní plochy.Jejich lokalizace je v počátcích vzniku usnadněna výskytem lesklých ohraničených plošek. Poté v procesu porušování vesměs následuje oddělení materiálu povrchové vrstvy od základní matrice. Také bylo prokázáno, že pod martenzitickou vrstvou, která se od základní feriticko-perlitické matrice odděluje obvodovou trhlinou, se vyskytuje mikrostruktura se 100 % sferoidizovaným perlitem, což svědčí o dosažení nebo překročení teploty A_1.

V souvislosti s výskytem martenzitu (event. bainitu) je nutno podotknout, že kinetika růstu částic těchto tvrdých mikrostruktur je charakterizována vysokou rychlostí jejich tvorby, konkrétně rychlostí odpovídající rychlosti šíření elastických deformačních vln. Orientujeme-li se podle jednorozměrné vlnové teorie, jde o tzv.fázovou rychlost vlny

o velikosti c = 5100 ms^{-1}. Při rychlosti odvalování železničního kola 200 km/hod dojde k opakovanému dotyku téže plošky za 0,05 s, což při průměru kola ∅ 920 mm odpovídá dráze 2,89 m. S ohledem na vysokou hodnotu fázové rychlosti c je tedy zřejmé, že zmíněné zákalné struktury mohou vzniknout jednorázově a bezprostředně po zániku stykové plošky. Existence kritické ochlazovací rychlosti je pravděpodobná s ohledem na malé zasažené objemy materiálu (vrstvy) a zároveň je její vznik podpořen vlnovým charakterem tepelného děje, jak bude naznačeno v odst.3.

Uvedenými poznatky autoři naznačují, že výzkum na základě metalografické analýzy lze považovat za ukončený. Autoři tohoto příspěvku jsou však přesvědčeni, že ke konečnému vysvětlení diskutovaného jevu, jehož vznik je často připisován absenci špalíkového brzdění, je nezbytná realizace stylizovaných zkoušek na specializovaném zařízení, na kterém lze opakovaně a kontrolovatelně nastavit všeobecné parametry styku kola s kolejnicí.

Takto bude umožněno studovat širší souvislosti související s historií zatěžování a procesy nukleace poruch, které v konečné fázi znamenají porušení lokální únosnosti zatíženého povrchu kola.

2. Nástin problémů teoretické analýzy

Klasický přístup k popisu deformačních nebo napěťových stavů v oblasti kontaktu, byť i s použitím produktivních výpočtových systémů umožňujících respektovat materiálové nelinearity [2], nemůže podat uspokojivé odpovědi na problémy poškozování materiálu v kontaktní oblasti. Deformační stavy jsou mimo jiné vlivy silně závislé na stavu povrchu, přesněji řečeno **na stavech a vlastnostech rozhraní ve tvaru tenké obvodové vrstvy.**

Z teorie i praktických poznatků týkajících se styku kola s kolejnicí je známo, že kolo při svém pohybu vykonává složený pohyb se všemi důsledky vzniku okamžitých a jednoznačně orientovaných skluzů a adekvátních skluzových sil. Vzájemná interakce stykových povrchů znamená (z hlediska povrchu kola) vznik všeobecného procesu degradace vedoucí k opotřebení, vlnitosti, vzniku zárodků poruch apod. Jedná se vesměs o procesy mající svou "historii" a nelze vyloučit, že počáteční stavy povrchů, případně makrogeometrie povrchů, nebudou celý následný proces degradace nezanedbatelně ovlivňovat [3].

Není bez zajímavosti, že na tuto skutečnost je zcela jiných hledisek upozorňováno tvůrci programových systémů numerické simulace v souvislosti s kontaktní tvarovou optimalizací [4]. Komplikace vznikají již při respektování vlivu třecích sil a to již při elementárním modelu, založeném na Coulombově zákonu tření. Z numerického hlediska není podle [4] dosud dopracována spolehlivá konvergenční teorie. Kontaktní vrstva je vesměs vytvářena pomocí speciálních kontaktních elementů (NASTRAN, MARC, COSMOS), což může znamenat nejen zajištění spolehlivějších numerických procedur, ale i prostředek k vylepšování matematického modelu kontaktní vrstvy. Nelze ovšem

očekávat, že v současné době existuje spolehlivá termomechanická teorie kontaktu. Provedená řešení, byť významná, jsou obvykle vedena tak, že je např. definovaná práce třecích sil a následně je studována odpovídající napjatost v kontaktní oblasti, vliv plastické deformace na vznik teplotního pole apod. Významný výpočet v tomto směru byl podán v [5], kde je řešení provedeno pomocí programového konečně-prvkového systému ANSYS 5.3. Nicméně však problematika tepelného zdroje v kontaktu je zjednodušena na prosté počáteční podmínky ve formě tepelného výkonu třecích coulombovských sil a ve formě plošného tepelného toku podél obvodu kola, případně přes Hertzovou plošku styku. V tomto případě práce [5] jednoznačně ukazuje na možný vznik tepelného šoku při skluzu kola s rychlostí 2,72 $m.s^{-1}$. Výpočtem byla předpovězena teplota ve styku vysoko převyšující hodnotu A_3.

3. Hypotéza existence tepelného zdroje v kontaktní vrstvě reálné tloušťky.

Vycházíme-li z předpokladu reálnosti kontaktní vrstvy, ustupujeme od klasické představy drsných povrchů, kde se realizují příslušné třecí síly. Při existenci tepelného zdroje v této oblasti s teplotami nad hodnotou A_3 je dále vycházeno z následující hypotézy. Odporové síly odpovídající reálným skluzům jsou vyvolány přemísťováním elementární částice v prostředí kontaktní vrstvy konečné tloušťky. Je-li přemísťování částice charakterizováno skluzovou rychlostí v_s, pak odpovídající jednotková odporová sila je

$$dT_s = \mu k.ds \,, \qquad (1)$$

kde součin μk charakterizuje napětí plynoucí z vnitřního odporu definovaného prostředí, včetně odporů vznikajících na okrajích vrstvy. Teplota generovaná v důsledku přemísťování částice je

$$T = \mu.k\sqrt{\frac{2v_s s}{\lambda.c.\gamma}} \,, \qquad (2)$$

kde:

s ..... okamžitá délka stykové vrstvy,

λ ..... měrná tepelná vodivost,

γ ..... měrná tíže,

c ..... měrné teplo oceli.

Hodnota součinu μk byla podle [6] určena z empirického vztahu

$\mu.k = (10,5 - 9,0.10^{-3}T)\,(14 - 0,01T)\,(1,4 + C)$ [MPa].

Je zde zřejmá závislost na teplotě T a množství uhlíku v oceli C[%]. Tak např. pro hodnoty:

$\mu k = 6,0.10^{7}\ Nm^{-2}$, $v_s = 1,0\ ms^{-1}$, $s = 8.10^{-3}\ m$, $\lambda = 46,0\ Ns^{-1}\ .^{\circ}C^{-1}$, $c = 50,23\ m.^{\circ}C^{-1}$, $\gamma = 78,0.10^{3}\ Nm^{-3}$, C = 0,4 %, T = 550 °C obdržíme:

$$\mu k = 84,9 \qquad \text{[MPa]}$$

a po dosazení do vztahu (2)

$$T = 84,9.10^{6}\sqrt{\frac{2,0.1,0.8,0.10^{-3}}{46,0.50,23.78,0.10^{3}}} \cong 800^{o}C$$

Kontakt tedy v každém okamžiku představuje lokální tepelný zdroj o teplotě T=800°C. Pro maximální tloušťku kontaktní vrstvy byl odvozen vztah

$$\partial = \sqrt{\frac{2as}{v_s}}, \qquad \text{[m]} \qquad (4)$$

kde pro hodnotu a (měrná tepelná vodivost) platí:

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{46,0}{50,23.78.10^{3}} = 11,7.10^{-6} \qquad [m^2.s^{-1}].$$

Po vyčíslení podle (4) obdržíme

$$\partial = \sqrt{\frac{2,0.11,7.10^{-6}.8,0.10^{-3}}{1,0}} = 0,43.10^{-3} \qquad \text{[m]}.$$

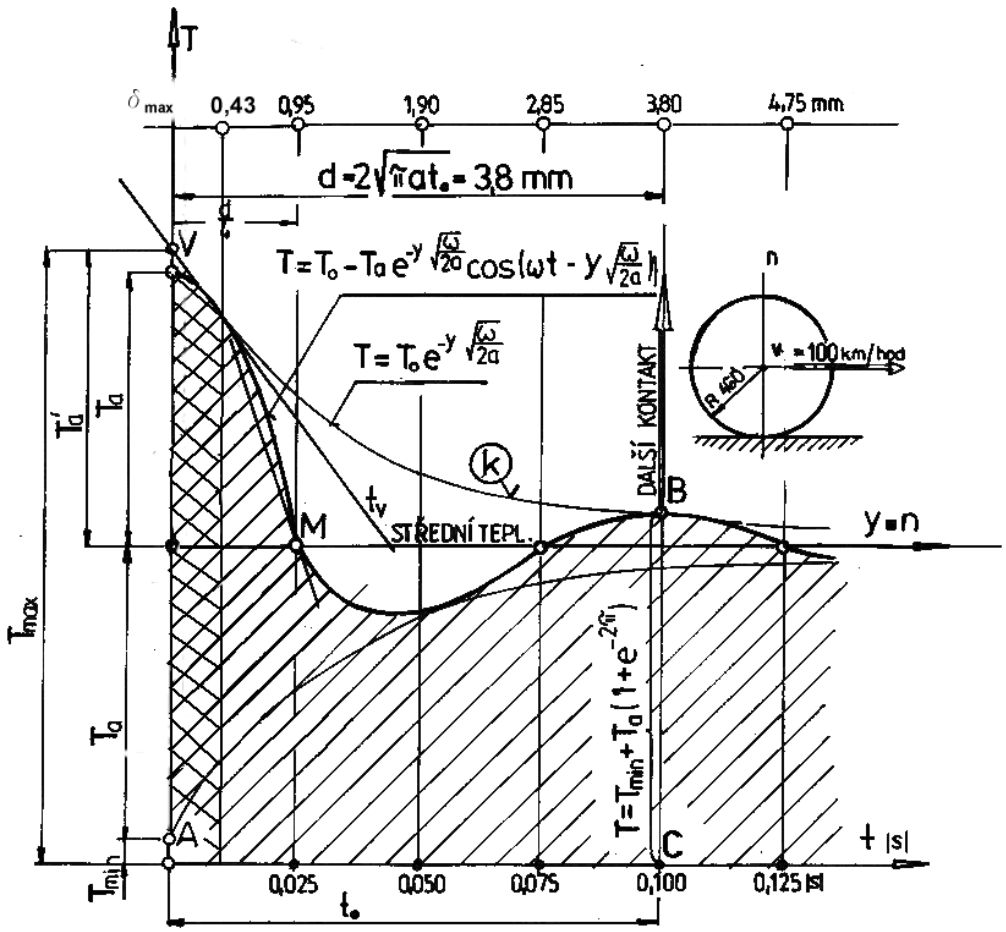
Při rychlosti jízdy v=100 km/hod je perioda zatížení téže kontaktní oblasti daná časem

$$t_0 = 2\pi Rv^{-1},$$

což při poloměru kola R = 0,46 m a rychlosti v =27,77 ms^{-1} činí t_0 = 0,1 s. Tomuto času odpovídá délka radiální tepelné vlny o hodnotě

$$d = 2\sqrt{\pi a t_0} = 2\sqrt{\pi.11,7.10^{-6}.0,1} = 3,8.10^{-3} \qquad \text{[m]}.$$

Chápeme-li tedy tepelný děj jako vlnový, je průběh teplot ve směru radiálním (n ≡ y) znázorněn na Obr. 1. **Je zřejmé, že při respektování tepelného vlnění dochází k maximálnímu tepelnému spádu v podpovrchové oblasti.**



Obr. 1

Ve sledovaném případě tomu odpovídá hloubka 0,95 mm_pod povrchem (bod M) při uvažované délce styku $s=8.10^{-3}$ m a stanované hodnotě $\delta=0,43.10^{-3}$ m. Jelikož tato maximální hodnota se podle (4) mění od nuly do maxima, lze se orientovat podle střední hodnoty $\delta_{stř}=0,2.10^{-3}$ m, což je hodnota menší nežli souřadnice bodu M o velikosti

$$y = 0,25d = 0,25.3,8.10^{-3} = 0,95.10^{-3} \quad [m].$$

V rámci předložené inženýrské úvahy lze tedy přijmout veškeré konstanty tepelného výpočtu a v tomto prvním přiblížení neuvažovat jejich funkční vztahy v závislosti na teplotě.

Dospíváme tedy k závěru, že okamžitý kontakt kola s kolejnicí představuje pulzující tepelný zdroj odpovídající tloušťce vrstvy v hodnotách desetin mm.

4. Navrhované zkušební zařízení

Nezbytné experimentální ověření hypotéz uvedených v předcházejícím odstavci nelze spolehlivě realizovat v provozních podmínkách.Nezastupitelně se jeví specializované testy na zařízení, které je schopno co nejreálněji imitovat styk kola s kolejnicí s kontrolovatelným periodicky se opakujícími všeobecnými parametry zatížení a jasně definovanou kinematikou a geometrií styku.

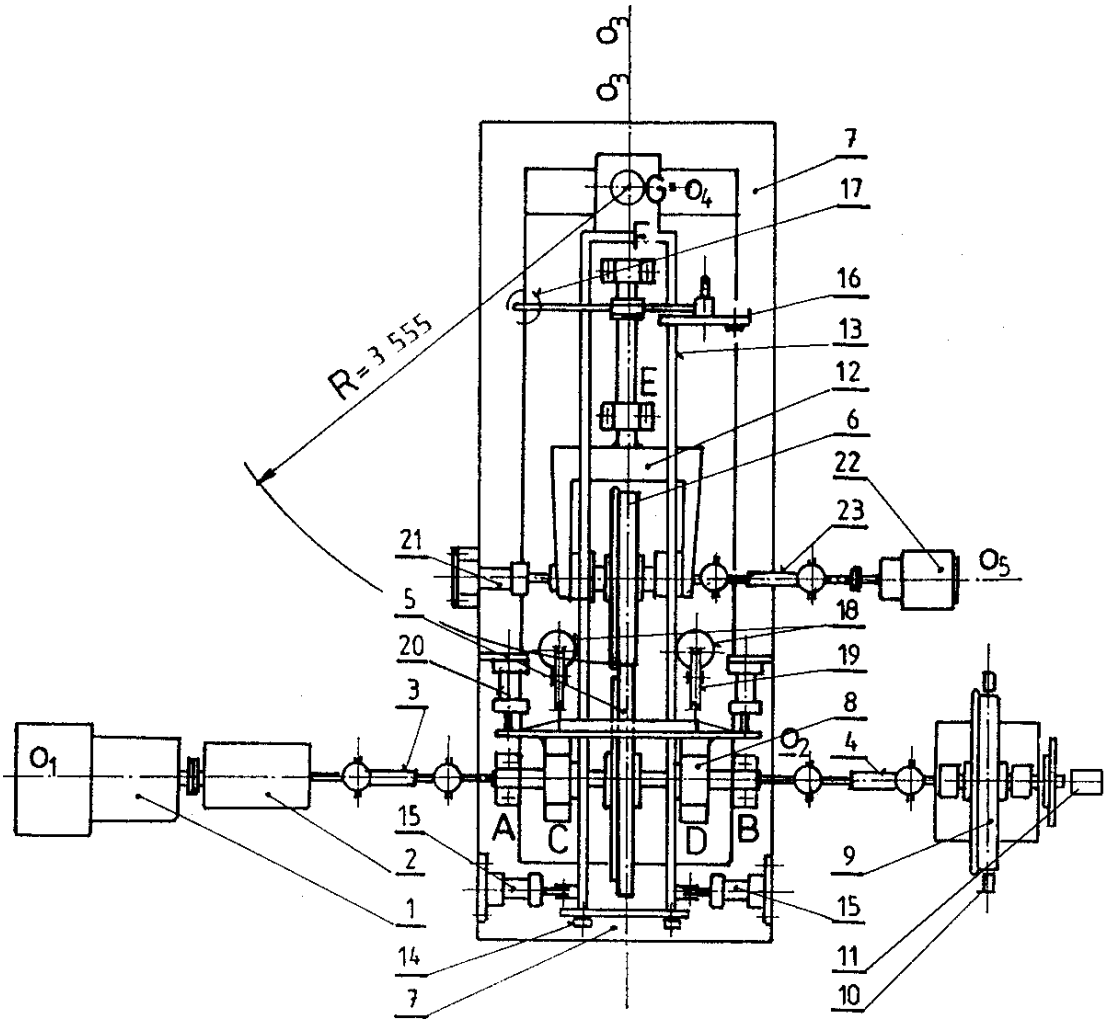
Zamýšlené experimentální programy, k jejichž realizaci byla koncepce zkušebního stavu podřízena, lze rozdělit do tří základních skupin:

1. Experimentální výzkum procesů opotřebení a poruch na oběžné ploše železničního kola.
2. Experimentální výzkum adheze při všeobecných podmínkách zatížení a souvisejících relativních pohybech ve styku kolo-kolejnice.
3. Zkoušky mechanické části brzdy kolejových vozidel.

Základní schéma testovacího zařízení je uvedeno na obr.2. Na základním rámu 7, pružně uloženém vzhledem k základům, je v ložiskách A,B otočně uložen vertikální rám 8, nesoucí v ložiskách C,D rotující kolejnici 5 o průměru 1240 mm. Kolejnice je poháněna regulovatelným elektromotorem 1, přes převodovou skříň 2 a kloubovým hřídelem 3. Na protilehlé straně rotující kolejnice 5 je přes kloubový hřídel 4 napojeno testované železniční kolo 9. Pozicí 10 je označen systém zdržové, případně kotoučové brzdy, pozicí 11 snímací kolektor elektrických veličin. Rotující kolejnice 5 je v kontaktu s železničním kolem 6 (osa o_5), které je uloženo ve vidlici 12. Tím je umožněno realizovat kývavý pohyb kolem vodorovné osy o_3, odpovídající spinové oscilaci.

Ložiska vidlicového rámu 12 E,F jsou vázaná k rámu příčné oscilace 13. Tento rám je na poloměru R rotačně uložen vzhledem k základnímu rámu 7 (osa $o_4 \equiv$G). Na čelní straně je rám 13 opatřen dvěma odvalovacími kladkami 14. Kývavý pohyb kolem vertikální osy o_4 je zajištěn dvojicí elektronicky řízených hydraulických válců 15.

Spinová oscilace kolem osy o_3 je vyvolána a řízena nevyváženým rotujícím kotoučem 16 s direkční pružinou 17, protilehle uloženou (ve svislém směru) vzhledem k páce pevně spojené s hřídelem vidlice 12.



Obr.2

Normálová kolová síla je vyvolaná symetricky uspořádanou dvojicí závaží 18 přes systém převodových lanových kladek 19. Statická hodnota kolové síly je dynamicky modelována dvojicí hydraulických válců 20 pracujících proti silovému účinku závaží 18. Otočně uložený rám 8 byl rozměrově volen tak, aby bylo docíleno vhodného pákového převodu a tak umožněna instalace reálné hmotnosti závaží 18. Boční kolová síla je vyvolána přímým účinkem hydraulického válce 21, opřeného o základní rám 7.

Přenášený výkon od motoru 1 přes kontakt „kolo-kolejnice“, tj. přes dvojici kol 5, 6 je řízen zátěžovým dynamometrem 22 napojeným přes kloubový hřídel 23 (osa o_5).

Systém uspořádání testované dvojice 5, 6 umožňuje experimentálně studovat fyzikální jevy kontaktu „kolo-kolejnice“, jež jsou v úvodu uvedeny pod body 1 a 2.

Základní parametry zkušebního zařízení jsou následující:

1. Max.obvodová rychlost na styku kolo-kolejnice (pos. 5, 6) 200 km/hod
2. Výkon hnacího el.motoru 138,2 kW
3. Automatická převodovka PRAGA 2M90.09 - pro přenášený výkon 160 kW
4. Max.přítlačná síla: ve zdrži 60 kN, v kotouči 31 kN
5. Max. frekvence spinové oscilace 3 Hz
6. Max.frekvence příčné oscilace 4 Hz
7. Max. kolová síla 120 kN

5. Závěr

Poškozování jízdní plochy železničních kol jako důsledek změn struktury v povrchových vrstvách je dlouhodobě sledovaný problém. Informace a hypotézy daného příspěvku mají poukázat na nezastupitelnost specializovaných experimentů při výzkumu fyzikálních dějů v oblasti kontaktu kolo-kolejnice. Příslušná zkušební zařízení, z nichž jedno bylo projektováno a je postupně realizováno na DFJP na Univerzitě v Pardubicích, představují značné investiční nároky, jelikož se jedná o zkoušky kontaktu a brzdění skutečného kola při reálných rychlostech odvalování, věrohodných a kontrolovatelných relativních pohybech ve styku a při reálných kolových silách.

Lektoroval: Doc. Ing. Daniel Kalinčák, CSc.
Předloženo v březnu 2000.

Poznámka: Projekt a dílčí realizace zkušebního zařízení byly součástí řešení grantového projektu GAČR č. 101/98/0246 Optimalizace a součinnost brzdových systémů kolejových vozidel.

Literatura:

[1] Kaloč, R., Kout,J.:Styk kola s kolejnicí jako tepelný děj. Sborník II. vědecké konference DFJP, Pardubice, 1999, str. 89-97.

[2] Vaculík, V.: Nelineární řešení stavu napjatostí a deformace v kontaktu dvou těles.Aplikovaná mechanika, sekce 17, TU Ostrava, 1995.

[3] Polužkin, V.P.: Naděžnosť i dolgověčnosť valkov cholodnoj prokatki. Metalurgia, Moskva, 1971.

[4] Dostál, Z.: Efektivní paralelní algoritmy pro výpočet napětí a deformace v kontaktu těles. Projekt GAČR 101/94/1853, Praha, 1998.

[5] Petruška, J.: Deformačně napěťové a tepelné poměry v kontaktu žel. kola a kolejnice . Zpráva pro ŽDB 1998, VÚT Brno, strojní fakulta, UMT.

[6] Oding, I.A.: Revue de Metalurgie, 1958, No 5, str. 448-452.

Resumé

VÝZNAM EXPERIMENTŮ PŘI STUDIU PŘÍČIN POŠKOZOVÁNÍ JÍZDNÍ PLOCHY ŽELEZNIČNÍCH KOL.

Rudolf KALOČ, Jaroslav JANDA

V příspěvku je podána informace o průběhu výzkumu kontaktu kola s kolejnicí. Je uvedena úvaha o tepelném zdroji v kontaktu a poukázáno na nezbytnost experimentálního ověření, které si vyžaduje speciální zkušební zařízení.

Summary

SIGNIFICANCE OF EXPERIMENTS FOR INVESTIGATION OF CAUSES OF RAILWAY WHEEL TREAD FAILURE.

Rudolf KALOČ, Jaroslav JANDA

The paper presents information on course of research in field of railway wheel - rail contact. The consideration of heat source in the contact is given, and necessity of experimental verification by means of special testing equipment is suggested.

Zusammenfassung

BEDENTUNG DER EXPERIMENTE BEI DER UNTERSUCHUNG DER BESCHÄDIGUNGEN – URSACHEN VON LAUFFLÄCHEN DER EISENBAHNRÄDER

Rudolf KALOČ, Jaroslav JANDA

In dem Beitrag wird über den Verlauf der Untersuchung zum Rad-Schiene-Kontakt informiert. Dabei wird die problematik der Wärmequelle in der Berührungsfläche verfolgt. Die experimentelle Überprüfung ist durchzuführen, dabei muss aber ein spezieller Prüfungsstand zur Verfügung stehen.