

Abstract/Kurzzusammenfassung:

Mit einem Bremsbelagskraft-Messsystem kann der Verschleisszustand von Bremssystemen überprüft werden. Daraus werden geeignete Massnahmen für die prädiktive Instandhaltung abgeleitet, die bei gleicher oder höherer Sicherheit wirtschaftliche Vorteile bietet. Dazu sind eisenbahnrechtliche, normative und technische Rahmenbedingungen einzuhalten (Risikonachweis nach CSM-RA 352/2009 bzw. 402/2013).

Die Untersuchung zeigte eine sehr kleine Streuung der Messwerte im Labor sowie eine hohe Prozessfähigkeit der mit dem Messsystem untersuchten Bremssysteme. Dies ermöglicht eine sicherheitstechnisch bedenkenlose Anwendung des Messsystems.



Dipl. Ing. Daniel Kobler Ammann
Kistler Instrumente AG

Daniel Kobler Ammann ist Business Development Manager bei der Firma Kistler Instrumente AG in Winterthur und als solcher verantwortlich für Anwendungen im Bahnbereich



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rösch
RöschConsult Group GmbH

Vorsitzender der Geschäftsführung der RöschConsult Group, Unternehmensberatung und Ingenieurbüro für Betrieb und Instandhaltung von Schienenfahrzeugen, Reinheim

Prozessfähigkeit der Bremsbelagskraftmessung in der Instandhaltung

Einleitung und Ausgangslage

Bei der Instandhaltung von Schienenfahrzeugen geht es darum, die Verfügbarkeit und Betriebssicherheit zu erhalten. Dabei wird heute vermehrt auch Wert auf optimierte Effizienz gelegt. Eine Möglichkeit dazu bietet die Umstellung von der zeitbasierten, präventiven zur zustandsbezogenen, prädiktiven Instandhaltung.

Entscheidend ist, dass die richtigen Zustandsgrössen mit geeigneten Messmitteln geprüft werden. Die Eignung der Messmittel richtet sich hier nicht nur nach technischen Kriterien, sondern auch danach, ob damit rechtliche und normative Bedingungen erfüllt werden können. Neben der Messabweichung ist dabei auch die Wiederholbarkeit von grosser Bedeutung. Hier beschränkt sich der Betrachtungsrahmen aber nicht nur auf das Messmittel, sondern auf das Messmittel *und* den zu beurteilenden Prozess. Die Prozessfähigkeit bzw. der Prozessfähigkeitsindex CpK bietet hier ein statistisches Werkzeug, um die Eignung eines Prüfverfahrens zu beurteilen.

Die Bremsbelagskraftprüfung ist ein geeignetes Verfahren, um die Instandhaltung zu optimieren und die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Mit der periodischen, systematischen Durchführung von Bremsbelagskraftprüfungen kann die zustandsabhängige Instandhaltung zuverlässig und sicher eingeführt werden. Dazu ist allerdings eine ausreichende Zuverlässigkeit (also Wiederholbarkeit) des Prüfprozesses eine zwingende Bedingung, weil die Funktionalität der Fahrzeugbremsen direkt vom angewandten Prüfprozess und den verwendeten Messmitteln abhängt.

Rechtliche und normative Rahmenbedingungen

Die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen ist in Europa seit 2008 neu geregelt. Zu diesem Zeitpunkt wurde die instandhaltungsverantwortliche Stelle Entity in Charge of Maintenance, kurz ECM, als neue Rechtsperson in das Eisenbahnrecht eingeführt. Sie verantwortet den sicheren Zustand der Schienenfahrzeuge. Die Eisenbahnverkehrsunternehmen verantworten den sicheren Betrieb dieser Fahrzeuge. Die ECM-Funktion wurde als Bestandteil des Eisenbahnpaketes 2.2 auch von der Schweiz übernommen. Als Bestandteil des Staatsvertrages über den internationalen



Abb. 1: Kistler Bremsbelagskraftmesssystem Typ 2899A... im stabilen und kompakten Werkstattkoffer

Austausch von Schienenfahrzeugen COTIF wurde die ECM-Funktion ebenfalls auf alle Unterzeichnerstaaten übertragen. Gleichzeitig mit der Einführung der ECM gelten die Bestimmungen für das Risikomanagement gemäß der Verordnung CSM-RA (EU) 402/2013 resp. (EU) 352/2009 (Common Safety Methods – Risk Assessment) unter anderem auch für Änderungen am Instandhaltungssystem.

Der Übergang von der präventiven Instandhaltung zu einer zustandsbezogenen Instandhaltung und der darauf aufbauende, nächste Schritt zur prädiktiven Instandhaltung erfordert neue Methoden zur Feststellung von Zustandsveränderungen. Insbesondere die Zustandsfeststellung soll anhand von Daten erfolgen, die sich im Betrieb oder weitgehend demontagefrei in der Instandhaltung gewinnen lassen und eindeutige Erkenntnisse über bereits eingetretene oder zu erwartende Zustandsänderungen ergeben. Dabei sind nicht nur die Momentanwerte bestimmter Zustandsgrössen zu prüfen, sondern über ein geeignetes Datenmanagement die beanspruchungsbezogene Entwicklung

dieser Daten über mehrere Prüfungen. Aus diesen Anforderungen leitete sich die Aufgabenstellung für das hier vorgestellte Bremsbelagskraftmesssystem ab. Für den Sicherheitsnachweis ist aber im Sinne der CSM-RA zunächst die Prozessfähigkeit des Messsystems nachzuweisen.

Das Bremsbelagskraftmesssystem

Das verwendete Messsystem der Firma Kistler Instrumente AG besteht aus massiven Messelementen mit integrierten piezoelektrischen Kraftsensoren, die als Messunterlagscheiben ausgeführt sind. Die Messelemente, die für Klotz- und Scheibenbremsen erhältlich sind, werden anstelle der Bremsbeläge in die Bremssysteme eingebaut. Beim Betätigen der Bremse werden die Messelemente mit der Belagskraft beaufschlagt. Die Kraft wird im Messelement auf die Piezokristalle übertragen. Diese erzeugen eine elektrostatische Ladung, die proportional zur angewandten Kraft ist. Das Messsignal wird über robuste Kabel zum Ladungsverstärker-Modul geleitet. Messverstärker und Datenerfassungseinheit sind mit einer netzunabhängigen Speisung in einem stabilen und kompakten Werkstattkoffer integriert, in dem auch die Sensoren Platz finden (Abb. 1). Die Datenerfassungseinheit ist über eine WiFi-Verbindung mit dem Service-Laptop verbunden. Es versteht sich, dass die hier verwendeten Sensoren nur für statische Belagskraftmessungen im Depot verwendet werden dürfen.

Prozessfähigkeit bei der Bremsbelagskraftprüfung

Der Prozessfähigkeitsindex C_{pK} charakterisiert den Abstand zwischen gemessenen Werten und den Spezifikationsgrenzen (USG, OSD) entsprechend der Formel

$$C_{pK} = \frac{\min(\mu - USG, OSD - \mu)}{3 \cdot \sigma}$$

Im besprochenen Fall, nämlich der Bremsbelagskraftmessung, setzt sich die Standardabweichung σ aus Einflüssen des Brems- sowie des Messsystems zusammen. Für die Beurteilung der Prozessfähigkeit der Bremsbelagskraftmessung muss zwischen der Standardabweichung des Prüflings (Bremsystem) und des Messmittels (Bremsbelagskraftmesssystem) unterschieden werden.

Der Wert sagt etwas darüber aus, wie sicher eine Prozessgröße gegenüber einer Spezifikationsgrenze vom Prozess reproduziert bzw. eine Messgröße gegenüber einer Spezifikationsgrenze vom Messsystem gemessen werden kann. Gemeinhin wird heutzutage von technischen Prozessen erwartet, dass sie einen C_{pK} -Wert von mindestens 1,67 aufweisen, was einem Abstand zwischen Mittelwert und der nächstgelegenen Spezifikationsgrenze von 5σ entspricht.

Bei der Messung der Bremsbelagskraft an realen Bremssystemen werden die Streuungen des Messsystems und die Streuung des Bremssystems überlagert. Durch die vorgängige Überprüfung des Messsystems im Kalibrierlabor kann die alleinige Streuung des Messsystems (Sensoren und Messelektronik) ermittelt werden.

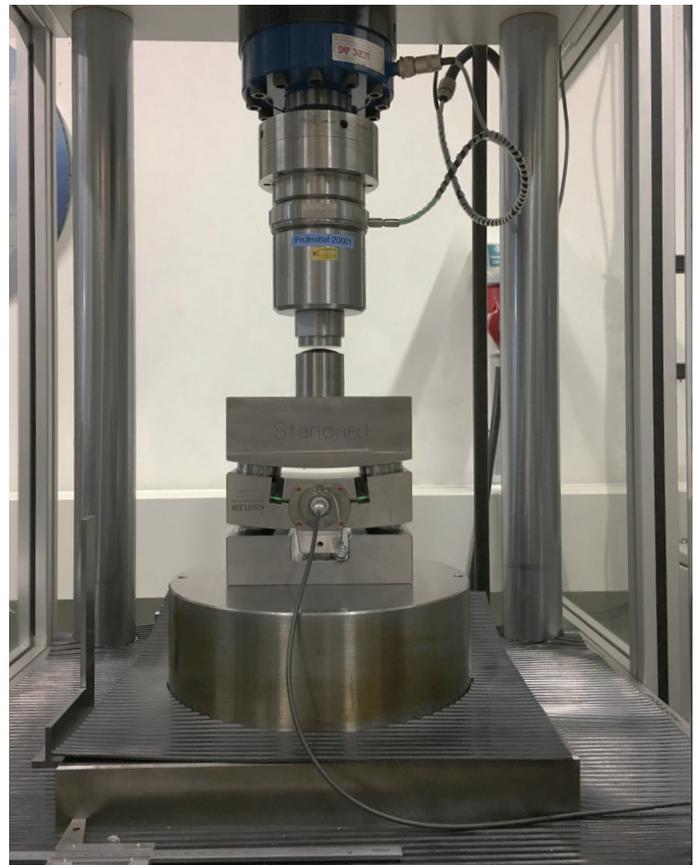


Abb. 2: Der Belagskraftsensor Kistler Typ 9305A1B in der Kalibrierpresse

Durchgeführte Tests

Die Sensoren wurden in drei verschiedenen Systemen getestet (Kalibrierlabor, Doppel-Klotzbremse auf einem älteren Triebfahrzeug [BDe 4/4], Scheibenbremse auf einem isolierten Drehgestell mit direkter Druckluftspeisung).

Im Kalibrierlabor wurden beide Sensortypen (Typ 9305A1B für Klotzbremse und Typ 9303A1B für Scheibenbremse) auf einer elektrohydraulischen Kalibrierpresse mit einer Referenzkraft belastet. Auf einer ähnlichen Kalibrierpresse wird auch die Werkskalibrierung durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit der aufgebrachten Kraft ist mit solchen Laborpressen sehr hoch, so dass die Streuung im Vergleich zum produktiven Messsystem vernachlässigt werden kann.

Im praktischen Einsatz wurden die Sensoren für die Klotzbremsen auf einem kompletten Fahrzeug getestet. Es handelte sich dabei um ein Doppelklotz-Bremssystem eines BDe 4/4 Triebwagens. Die Bremsklötze werden mit einer beweglichen Halterung gegen das Rad gedrückt. Beide Bremsklötze des Systems wurden durch einen Belagskraftsensor ausgetauscht (oben – unten). Die Messzyklen wurden so getätigt, dass der obere Sensor eingebaut blieb, während der untere Sensor zwischen jedem Bremszyklus aus- und wieder eingebaut wurde. Somit sollte auch der Einfluss der Sensormontage untersucht werden können. Bei der Streuung des oberen Sensors kann angenommen werden, dass sie zum allergrössten Teil nur vom Bremssystem her rührt, während beim unteren Sensor eine zusätzliche Streuung durch die Sensormontage dazu kommt.



Abb. 3: Doppelklotzbremse mit zwei eingebauten Belagskraftsensoren Kistler Typ 9305A1B

Die beiden Belagskraftsensoren für die Scheibenbremsen wurden an einem isolierten, sich in Revision befindlichen Drehgestell getestet. Beide Sensoren wurden dabei symmetrisch auf die linke und rechte Bremszange einer Achse montiert. Anstelle der Bremsscheibe wurden zwei Dummy-Blöcke verwendet. Beide Bremszangen wurden jeweils mit der gleichen Druckluftspeisung von 3,5 bar direkt betätigt. Auch hier wurde der Vergleich zwischen fest verbautem und jeweils bei jedem Bremszyklus neu montiertem Sensor gemacht. Es konnte hier schon zum Voraus vermutet werden, dass die Streuung zwischen beiden Sensoren nicht stark unterschiedlich sein wird, da die Sensoren relativ locker in der Halterung sitzen. Es macht daher keinen Unterschied, ob der Sensor zwischen den Bremszyklen in der Halterung montiert bleibt oder kurz aus der Halterung genommen wird.

Messresultate

Im Labor auf der Kalibrierpresse wurden pro Sensor je 20 Messungen vorgenommen. Das Augenmerk wurde dabei auf die Wiederholbarkeit des ausgewiesenen Messwerts bei einer Referenzkraft von 20 000 N gelegt. Der Versuchsaufbau wurde bei jeder Messung neu gemacht. Die ermittelten Standardabweichungen betragen beim Klotzbremsen-Belagskraftsensor $\sigma=0,050\%$ und beim Scheibenbremsen-Belagskraftsensor $\sigma=0,085\%$. Als Zusatzversuch wurde beim Scheibenbremsen-Belagskraftsensor gleichzeitig untersucht, wie der Einfluss einer axial schiefen Sensorlage ist. Dazu wurde der entsprechende Sensor ca. 1° um seine eigene Achse abgekippt und ebenfalls eine Messserie durchgeführt. Hier resultierte eine Standardabweichung von $\sigma=0,049\%$. Bei der gegebenen Messgröße (20 kN) beträgt die Standardabweichung also zwischen 10 und 20 N.

Auf dem Doppelklotz-Bremssystem wurden zehn Schnellbremsungen durchgeführt und gemessen. Gleichzeitig zu den beiden Kraftsi-

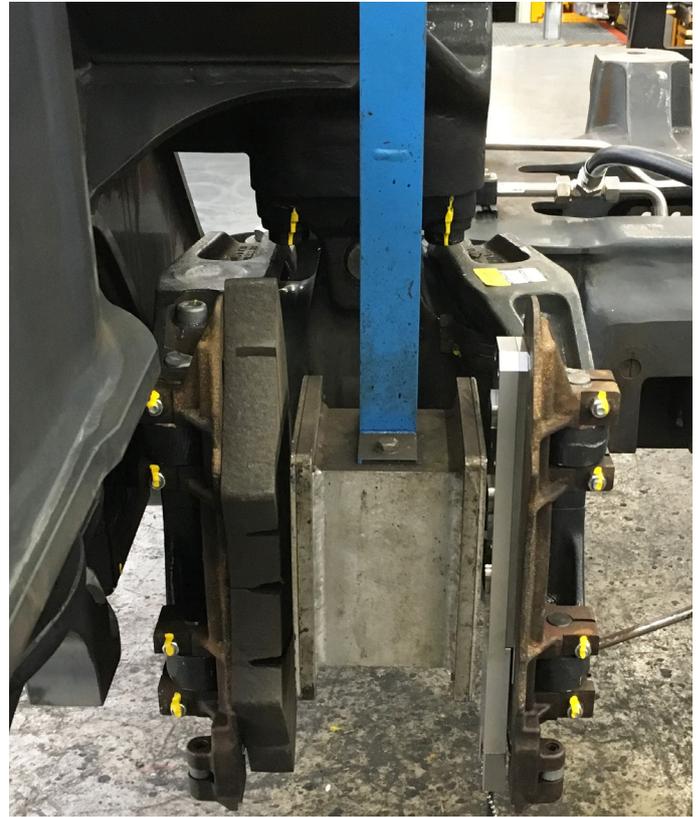


Abb. 4: Scheiben-Bremszange mit eingebautem Belagskraftsensor Kistler Typ 9303A1B (rechts)

gnalen wurde auch der Luftdruck am Bremszylinder gemessen. Hier wurde ein Mittelwert von 4,02 bar mit einer Standardabweichung $\sigma=0,268\%$ gemessen. Es ist offensichtlich, dass sich die Streuung des Luftdrucks auch auf die Streuung der Belagskraft übertragen würde. Ausserdem zeigte sich, dass die Kraft des Bremszylinders von der Bremsmechanik ungleichmässig auf den oberen und auf den unteren Bremsklotz verteilt wurde. Oben betrug die mittlere Kraft 15 232 N, wohingegen beim unteren Bremsklotz eine mittlere Belagskraft von 18'537 N gemessen wurde. Wie erwartet war die Streuung beim jeweils aus- und wieder eingesetzten Belagskraft-Messelement grösser als beim fix montierten, nämlich $\sigma=1,145\%$ oben, gegenüber $\sigma=1,248\%$ unten. Interessant war auch die zeitliche Entwicklung der gemessenen Belagskräfte. (siehe Abb. 5)

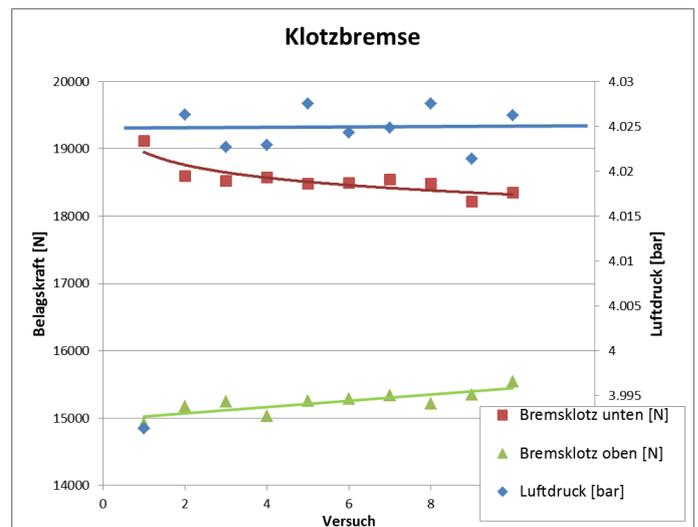


Abb. 5: Trendverlauf bei der Klotzbremse

Man erkennt, dass die Standardabweichung eben nur einen Teil der Wirklichkeit zeigt. Zusätzlich zur Streuung um einen Mittelwert ist auch die zeitliche Entwicklung dieser Streuung sehr aufschlussreich. Während der gemessene Luftdruck fast modellmässig stochastisch um den Mittelwert streut, sind bei den Belagskraftwerten deutliche zeitliche Entwicklungen erkennbar. Beim oberen Sensor nimmt die Kraft, scheinbar linear, stetig zu. Dies kann durch das Setzverhalten des Sensors in der Halterung erklärt werden. Mit jedem Bremszyklus wird die mechanische Kopplung zwischen Halterung und Belagskraft-Messelement steifer, so dass mehr Kraft gemessen werden kann. Die Abnahme der gemessenen Kraft beim unteren Sensor, der jedes Mal neu montiert wurde, ist noch nicht erklärt. Es wäre zu erwarten gewesen, dass gemessene Kraft ähnlich wie der Luftdruck stochastisch um einen Mittelwert streut.

Beim Scheibenbremssystem war die Streuung des Zylinderdrucks ähnlich gross, wie beim untersuchten Klotzbremssystem auf der BDe 4/4, nämlich $\sigma=0,223\%$ um den Mittelwert von 3,57 bar. Obwohl die beiden untersuchten Kräfte von zwei verschiedenen Bremszangen einer Achse (rechts – links) stammten, lagen sie sehr nah beieinander, nämlich 19 882 N und 19 459 N. Auch die Streuung ist sehr ähnlich ($\sigma 0,428\%$ und $0,390\%$). Wie bereits bei der Klotzbremse soll hier auch die zeitliche Entwicklung der Messwerte innerhalb des Versuchsprogramms dargestellt werden. (siehe Abb. 6)

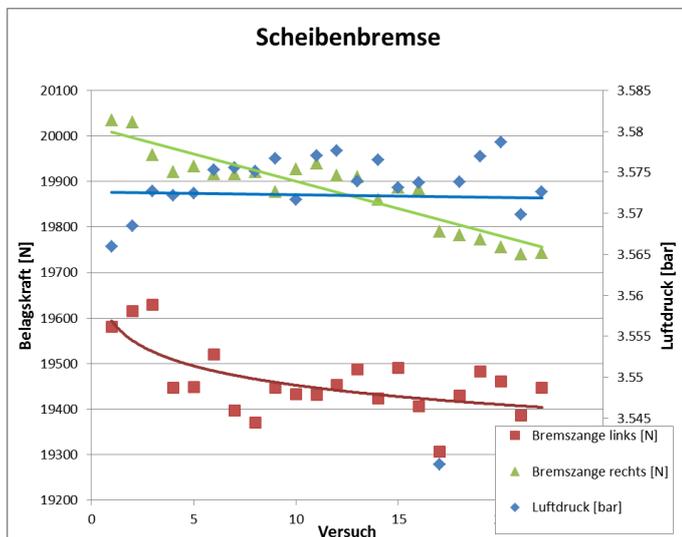


Abb. 6: Trendverlauf bei der Scheibenbremse

Bei diesen Bremssystemen ist bei beiden Bremszangen eine Kraftabnahme von ca. 200 N zu erkennen. Es ist kein Unterschied zwischen dem fest verbauten Belagskraft-Messelement und dem jeweils neu montierten zu erkennen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Sensoren relativ locker in der Belagshalterung sitzen, es also gar keinen Unterschied macht, ob der Sensor zwischenzeitlich entfernt und wieder eingesetzt wurde oder nicht. Dies erklärt auch die ähnliche Streuung.

Resultate bezüglich Prozessfähigkeit

Ziel der Untersuchung war es, Aussagen über die Prozessfähigkeit der Belagskraftmessung machen zu können. Wie aus der Formel für den Prozessfähigkeitsindex CpK ersichtlich ist, hängt der Wert dieses Index direkt von der unteren bzw. oberen Spezifikationsgrenze ab. In unserem Fall braucht es dazu einige Überlegungen. Die Frage der Toleranzen der Belagskraft wird gemeinhin eifrig diskutiert, so dass sich keine allgemein gültigen Aussagen machen können. Die Betrachtungen können von zwei Seiten her angestellt werden. Es gibt einerseits die Spezifikationsgrenzen aus den Bremsberechnungen für die einzelnen Bremssysteme hier fehlt aber der Bezug zu den fahrdynamischen Eigenschaften und die allgemeine Gültigkeit. Auf der anderen Seite sollten Bremssysteme so ausgelegt werden, dass ein Zug auch bei schwierigen Verhältnissen vor einem Hauptsignal zum Stillstand gebracht werden kann. Dazu wird allgemein eine Sicherheitsmarge von 20 % veranschlagt. Diese Sicherheitsmarge steht aber nicht nur für eine schwächelnde Belagskraft zur Verfügung. Sie kann auch durch schlechte Reibungsverhältnisse zwischen Bremsbelag und Reibpartner (Rad oder Brems Scheibe bzw. zwischen Rad und Schiene gemindert werden. Um eine Abschätzung der Prozessfähigkeit der Belagskraftmessung machen zu können, soll hier angenommen werden, dass für die Belagskraftmessung eine Toleranz von $\pm 6,66\%$ eingehalten werden muss. Dadurch ergeben sich für die untersuchten Bremssysteme Prozessfähigkeitsindizes entsprechend Tabelle 1.

Wenn man nochmals in Erinnerung ruft, dass ein CpK von mindestens 1,67 erwartet wird, um Bremskräfte zuverlässig reproduzieren zu können, so lässt sich mit Blick auf Tabelle 1 Folgendes kommentieren: Der pneumatische Bremsenddruck liess sich auf beiden Bremssystemen sehr präzise reproduzieren. Hier wurden die höchsten CpK erzielt, sowohl bei Betätigung ab Depot-Druckluftversorgung, als auch Bremspneumatiksystem des Fahrzeugs. Beide Scheibenbremssysteme weisen exzellente CpK-Werte von 5,27, bzw. 5,78 auf. Dies entspricht einer Streubreite von 16σ (Abstand des Mittelwerts zur näherliegenden Spezifikationsgrenze). Die untersuchten Doppelklotz-Bremssysteme erfüllen mit CpK-Werten von 1,81-1,97 die geforderten Werte ebenfalls deutlich. Der Unterschied zu den isolierten Bremszangen der Scheibenbremssysteme entsteht einerseits durch das etwas mehr streuende Pneumatiksystem des Fahrzeugs, andererseits durch die kompliziertere Mechanik zwischen dem Pneumatikzylinder und den Bremsbelägen.

	Klotzbremse (Doppelklotzhalterung)			Scheibenbremse		
Sensor	601CABQ01 Luftdruck	9305A1B oben	9305A1B unten	601CABQ01 Luftdruck	9303A1B Bremszange rechts	9303A1B Bremszange links
Montage		<ul style="list-style-type: none"> • Sensor einmal eingebaut • Sensorhalterung beweglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor für jeden Versuch neu montiert • Sensorhalterung beweglich 		<ul style="list-style-type: none"> • Sensor einmal eingebaut 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor für jeden Versuch neu montiert
Einheit	[bar]	[N]	[N]	[bar]	[N]	[N]
Azahl Messungen	10	10	10	22	22	22
Mittelwert Kraft [N]	4.02	15232	18537	3.57	19882	19459
Max. gemessene Kraft [N]	4.03	15545	19114	3.58	20035	19629
Min. gemessene Kraft [N]	3.99	14911	18220	3.54	19740	19307
Sigma	0.011	174	231	0.008	85	76
Sigma [% Mittelwert]	0.268 %	1.145 %	1.248 %	0.223 %	0.428 %	0.390 %
USG (93,2 %)	3.75	14201	17282	3.33	18536	18141
USG (106,8 %)	4.29	16263	19792	3.81	21228	20776
CpK	8.41	1.97	1.81	10.13	5.27	5.78

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messresultate

Zusammenfassung

Der Wechsel von der präventiven zur prädiktiven Instandhaltung erfordert neue Methoden zur Feststellung von Zustandsveränderungen, zum Beispiel systematische Bremsbelagskraftmessungen. Die Einführung oder Änderung von solchen Prozessen bedürfen eines Sicherheitsnachweises in Sinne der Verordnung CSM-RA (EU) 402/2013, resp. (EU) 352/2009 (Common Safety Methods – Risk Assessment). Die Sicherheitsbetrachtungen umfassen auch die verwendeten Messmittel. Vor diesem Hintergrund wurden mit dem Bremsbelagskraftmesssystem der Firma Kistler Instrumente AG, Winterthur im Labor die Streuung der Messwerte sowie auf verschiedenen Bremssystemen die Prozessfähigkeit untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten eine sehr kleine Streuung der gemessenen Werte im Labor. Die Standardabweichung σ beträgt hier zwischen 0,049 % und 0,085 % je nach verwendetem Sensor und Messaufbau. In der Praxis, also bei Belagskraftmessungen an Schienenfahrzeug-Bremssystemen, wird ein Prozessfähigkeitsindex CpK von mindestens 1,67 gefordert. Dieser Wert bestätigt einen Abstand des Mittelwertes der Messungen zur näherliegenden Spezifikationsgrenze von mindestens 5 σ . Die ermittelten CpK Werte, die Bremssystem und Messsystem kombiniert charakterisieren, liegen für beide untersuchten Bremssysteme bzw. für alle dabei untersuchten Parameter deutlich über dem geforderten Minimum.

Weiter zeigt die Untersuchung, dass die Streuung des Messsystems um 8...15-fach besser ist als die untersuchten Bremsprozesse. Dadurch ist das Kistler Bremsbelagskraftmesssystem ein geeignetes Mittel, die geforderten Sicherheitskriterien auch bei der prädiktiven Instandhaltung zu erfüllen.

Dank

Herzlichen Dank gebührt den Instandhaltungswerkstätten Südostbahn Service-Zentrum Samstagern und SBB Werk Yverdon-les-Bains, die es uns ermöglicht haben, in ihren Depots die Messungen auf den erwähnten Systemen durchzuführen. Ebenfalls herzlichen Dank an die Makies AG, Zell auf deren BDe 4/4 Versuchsmessungen durchgeführt werden konnten.

Kistler Group

Eulachstrasse 22
8408 Winterthur
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11

Kistler Group products are protected by various intellectual property rights. For more details see www.kistler.com. Kistler Group includes the Kistler Holding AG and all its subsidiaries in Europe, Asia, Americas and Australia.

Find your local contact on www.kistler.com