



LEISE, ENERGIEEFFIZIENT, WIRTSCHAFTLICH

BMVI-Forschungsprojekt
„Aufbau und Erprobung von Innovativen Güterwagen“

Zusammenfassungsbericht Lärm- und Energiemessungen
PROSE

Auftraggeber:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Hauptauftragnehmer
(Arge):



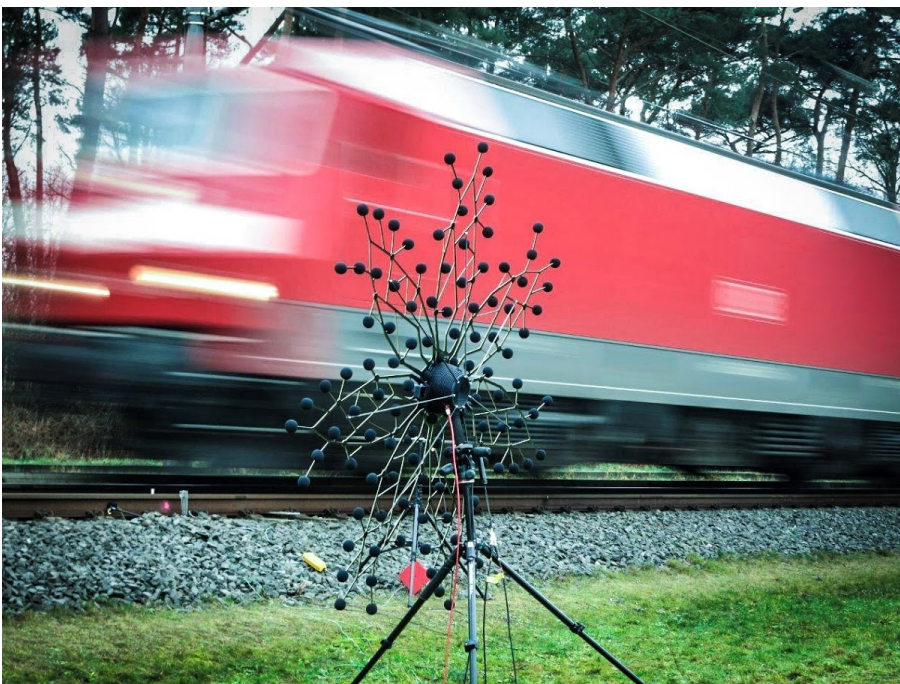
Auftragnehmer
für Energie- und
Lärmmessungen:



Innovative Güterwagen

Zusammenfassungsbericht

Bericht 02-01439 1.00



Auftraggeber: BMVI

Projektnummer: PDE.508

Druckdatum: 2. Juli 2019

PROSE GmbH

Colditzstraße 28 Geb. 7
Aufg. C
12099 Berlin
Deutschland

www.prose.one

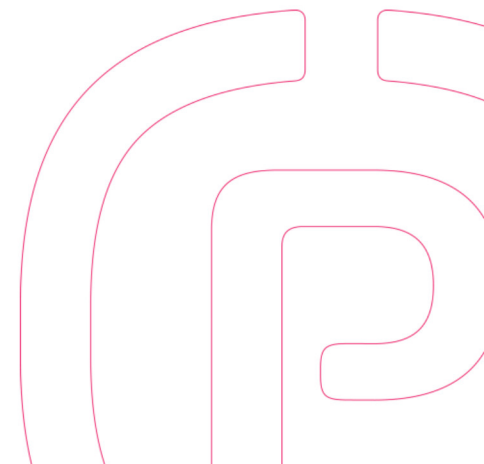
Tel +49 30 75 44 90 8-10
Fax +49 30 75 44 90 8-99
info.berlin@prose.one

PROSE AG

Zürcherstrasse 41
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

Tel +41 52 262 74 00
Fax +41 52 262 74 01
info.winterthur@prose.one



Erstellt	Geprüft	Freigeben	
S. Huijbers	C. Czolbe	K. Born	
Ausgabedatum	Revision	Revisionsdatum	Status
21.06.2019	1.00	02.07.2019	Released

Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Bemerkungen

Revisionsindex

	Ersteller	Prüfer	Freigebender	Datum
Rev.	S. Huijbers	C. Czolbe	K. Born	21.06.2019
Rev. 1.00	S. Huijbers	C. Czolbe	K. Born	02.07.2019
Rev.				
Rev.				
Rev.				
Rev.				

Modifikationen

Revision	Beschreibung
1.00	Rev. am 02.07.2019

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Akustikmessungen	8
2.1 Ergebnisse investigative Vorbeifahrtmessungen	8
2.2 Ergebnisse der Lärmmessungen während der Betriebserprobung	10
2.3 Ergebnisse Schallmessungen mit Hilfe der akustischen Kamera	12
3 Energieverbrauchsmessungen	15
4 Bremsmessungen mit und ohne EP-Light Bremse	16
5 Übersicht der Berichte	18

1 Einleitung

Auf Grundlage des Programms „Zukunftsinvestitionen insbesondere für öffentliche Infrastruktur und Energieeffizienz“ (ZIP) der Bundesregierung sollen die Möglichkeiten der Migration lärmindernder und energieeffizienzsteigernder Technologien untersucht werden.

Hierzu wurde durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ein Projekt im Rahmen der Auftragsforschung zu „Aufbau und Erprobung von innovativen Güterwagen“ ausgeschrieben und im September 2016 an eine Arbeitsgemeinschaft (im Folgenden kurz ARGE IGW) vergeben.

Im Rahmen dieses Projektes sollen vorhandene Komponenten und Technologien zu neuen und innovativen Güterwagen konzipiert, aufgebaut und erprobt werden. Die Ergebnisse der Lärmmessung sollen den Einsatz von innovativen Güterwagen beschleunigen, die leiser, energieeffizienter und gleichzeitig wirtschaftlicher als die bisher eingesetzten sind.

Das Projekt „Aufbau und Erprobung von innovativen Güterwagen“ soll durch eine unabhängige Untersuchung zum Energieverbrauch und zu den Geräuschemissionen der IGW begleitet werden.

Die Untersuchungen sollen dem Auftraggeber Aufschluss darüber geben, unter welchen Rahmenbedingungen welche Effekte in Bezug auf Energieverbrauchs- und Lärmreduzierung durch die IGW erzielt werden können. Weiterhin dienen die Untersuchungen dazu, der Arge IGW Informationen und Daten zur Verfügung zu stellen, um zum einen das akustische Verhalten der IGW zu optimieren und zum anderen Input für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu liefern.

Im Projekt IGW wurden durch die Arge bis Ende 2017 die folgenden vier Güterwagen-Gattungen neuentwickelt und prototypisch (je drei Ausführungen) aufgebaut:

- Vierachsiger Kesselwagen Zacens
- 80 ft Containertragwagen Sggns
- Zweigliedriger Autotransportwagen Laaers561
- Sechachsiger Flachwagen „BraCoil“ Shmmnps

Die genannten Güterwagen-Gattungen werden mit einer Reihe von innovativen Komponenten ausgerüstet, die Auswirkungen auf den Energieverbrauch bzw. auf die Lärmemissionen haben werden. Dies sind u.a.:

- innovative Drehgestelle (Kessel- und Containertragwagen)
- innovative Scheibenbremsen (Kessel- und Containertragwagen)
- innovative Radsätze
- Radsatzbeschichtungen
- Radschallabsorber
- Lärmschürzen (Kessel-, Containertragwagen und Autotransporter)
- automatische Pufferschmiereinrichtung
- ep-Bremse

Im Rahmen dieses Projekts wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Investigative Lärmmessungen während der Vorbeifahrt [1]
- Lärmmessungen während der Betriebserprobung [2]
- Schallmessungen mit Hilfe einer akustischen Kamera [3]
- Energieverbrauchsmessungen [4]
- Bremsmessungen mit und ohne EP-Light Bremse [5]

Dieser Bericht fasst alle Ergebnisse dieser Messungen zusammen. Die Verweise auf die Berichte sind in Kapitel 6 zu finden. Alle Berichte sind beim BMVI öffentlich verfügbar.

2 Akustikmessungen

2.1 Ergebnisse investigative Vorbeifahrtmessungen

Im Januar und Februar 2018 fanden auf dem Testring des Prüf-Centers Wildenrath (PCW) der Siemens AG Fahrgeräuschmessungen an verschiedenen Güterwagen im statt [1]. Die neuen "Innovativen Güterwagen" erwiesen sich dabei als lärmarm gegenüber konventionellen Güterwagen der gleichen Wagengattung. Tabelle 2-1 gibt eine gesamthafte Übersicht über die Ergebnisse der Lärmmessungen während der Messungen auf dem Testring des PCW.

Soweit nicht der Zustand der Räder (teilweise eingefahren und teilweise neu) hierfür verantwortlich ist, spielt das verwendete Bremssystem offenbar eine Schlüsselrolle in der lärmarmen Konstruktion. In scheibengebremsten Drehgestellen können Räder mit geradem Radsteg verwendet werden, welche konstruktionsbedingt weniger Schall abstrahlen als gewellte Räder. Dies führt zu einem Pegelunterschied von 3-4 dB gegenüber konventionellen Güterwagendrehgestellen mit Klotzbremsen.

Durch Radabsorber kann der Radschall bis zu einem gewissen Maße weiter reduziert werden. Bei den Tests erwiesen sich die Ringelemente von Bonatrans als sehr effektiv gegenüber anderen Beschichtungen und mechanischen Dämpfern.

Der Vorbeifahrpegel im Bogen ist i.d.R. höher als auf der Geraden, auch wenn kein Kurvenkreischen auftritt. Allerdings hängt der Pegelunterschied Bogen zu Gerade immer von den Radrauheiten ab, bei hohen Radrauheiten fällt dieser geringer aus als bei niedrigen.

In Bezug auf die Referenzwagen wurde bei den BraCoil Wagen in der Konfiguration 2 und 3 die höchsten Pegelunterschiede im Bogen von ca. 4 dB ermittelt. Bei den übrigen IGW lag der Pegelunterschied zum Referenzwagen i.d.R. im Bereich von 2 dB und weniger. Unter der Voraussetzung, dass die Radrauheiten der Fahrzeuge vergleichbar sind, könnte hier die Drehgestellkonstruktion, d.h. die radiale Einstellbarkeit im Bogen, verantwortlich sein.

In den Terzspektren der Bogenfahrten ist außer bei den Kesselwagen ein deutlicher Anstieg bei tiefen Frequenzen zwischen 100 und 1000 Hz zu erkennen. Diese Änderungen haben mitunter nur geringen Einfluss auf den A-bewerteten Summenpegel.

Die Schallschürzen wirken nur bei einer ausreichend hohen Abdeckung des Rades und einem hohen Anteil an schallabsorbierenden Flächen im DG Bereich. Dies konnte am besten beim Kesselwagen realisiert werden, bei dem der Vorbeifahrpegel um 1.4 dB durch die Schallschürzen reduziert werden konnte.

Die Radrauheiten entsprachen meist dem Neuzustand und es wurden i.d.R. sehr niedrige Summenrauheiten bei den Versuchen ermittelt.

Tabelle 2-1: Ergebnisse investigative Vorbeifahrtmessungen

Messung	Typ	Geschwindigkeit [km/h]	Bewertungsgröße	Akustik [dB(A)]												
				V7G Kesselwagen (4 RS)			V7G Containerwagen CTW (4 RS)			DBC Autotransportwagen (4 RS)			DBC Flachwagen "Bracoll" (6 RS)			
Anzahl Achsen	Grenzwert TSI Noise Vorbeifahrt Gerade 7,5 m	LTP	APL	80 LpAeq,Tp [dB(A)] (Grenzwert)	60 LpAeq,Tp [dB(A)] - eine Vorbeifahrt	80 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	100 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	120 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	60 LpAeq,Tp [dB(A)] - eine Vorbeifahrt	80 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	100 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	120 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	60 LpAeq,Tp [dB(A)] - eine Vorbeifahrt	80 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	100 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten	120 LpAeq,Tp [dB(A)] - Mittelwert von 3 Vorbeifahrten
Innovativ: Lucchini + Syope-Absorber	15,1	14,40	0,268	83,0	78,1	81,4	84,7	89,3	82,1	86,4	90,1	95,0	85,7	89,2	92,4	96,4
Innovativ: Lucchini ohne Syope-Absorber	16,1	14,40	0,278	83,0	78,6	81,4	84,8	89,3	82,5	86,5	90,4	95,1	85,7	89,8	92,2	94,2
Innovativ: Bonatrans	22:01	14,40	0,278	83,0	77,2	81,4	84,4	89,3	82,5	86,5	90,4	95,1	85,7	89,8	92,2	94,5
Innovativ: Bonatrans+Ringelement+Absorber	29:01	14,40	0,278	83,0	76,2	81,4	84,4	89,3	82,5	86,5	90,4	95,1	85,7	89,8	92,2	94,5
Innovativ: (mit Lärmschürze) Bonatrans+Ringelement+Absorber	02:02	14,40	0,278	83,0	74,8	81,4	84,4	89,3	82,5	86,5	90,4	95,1	85,7	89,8	92,2	94,5
Referenzwagen	33:1	25,94	0,154	82,7	76,3	80,1	82,8	87,9	81,1	85,4	89,3	93,1	83,8	86,9	90,6	93,1
Innovativ: Bonatrans+Ringelement	30:01	25,94	0,154	82,7	72,0	74,8	77,1	82,2	76,7	79,9	82,2	87,9	82,4	85,3	88,4	90,3
Innovativ: Bonatrans+Ringelement+Absorber	29:01	25,94	0,154	83,0	77,5	80,5	82,7	87,9	81,1	85,4	89,3	93,1	83,8	86,9	90,6	93,1
Innovativ: (mit Lärmschürze) Bonatrans+Ringelement	01:02	25,94	0,154	83,0	71,4	74,7	77,5	82,2	76,1	79,5	82,2	87,9	84,6	87,7	90,7	93,8
Innovativ: DG ELH Bonatrans + Ringelement	13:02	25,94	0,154	83,0	72,4	76,1	78,6	83,6	77,2	81,2	84,3	89,8	84,6	87,7	90,7	93,8
Referenzwagen	11:01	31,00	0,129	83,0	86,8	84,1	87,7	92,7	85,8	89,8	93,3	98,3	83,9	87,4	90,2	95,0
Innovativ: Bonatrans	05:02	33,00	0,121	83,0	80,4	77,2	79,7	84,3	76,0	82,0	84,3	89,8	81,6	86,1	90,2	95,0
Innovativ: Bonatrans+Ringelement	06:02	33,00	0,121	83,0	71,3	75,7	78,1	83,0	76,0	80,0	82,2	87,9	81,2	85,3	89,6	93,6
Innovativ: Lucchini+Absorber	09:02	33,00	0,121	83,0	80,3	77,6	80,7	85,6	76,0	82,8	85,5	90,4	83,3	87,2	91,6	96,1
Innovativ: (mit Lärmschürze) Bonatrans+Ringelement	16:02	33,00	0,121	83,0	79,1	76,2	78,9	83,8	76,2	81,7	84,3	89,8	83,3	87,2	91,6	96,1
Referenzwagen	05:02/09:02	16,40	0,366	83,0	82,4	84,5	86,0	91,6	85,6	89,0	94,0	99,0	87,3	90,0	94,9	99,1
Innovativ: Bonatrans	12:1	16,40	0,366	83,0	80,1	83,2	86,1	91,6	85,6	89,0	94,0	99,0	87,3	90,0	94,9	99,1
Innovativ: Bonatrans+Ringelement	19:1	16,40	0,366	83,0	76,4	78,3	81,0	86,3	85,6	89,0	94,0	99,0	87,3	90,0	94,9	99,1
Innovativ: GHH+Absorber	24:01	16,40	0,366	83,0	75,6	79,3	82,0	87,4	85,6	89,0	94,0	99,0	87,3	90,0	94,9	99,1

2.2 Ergebnisse der Lärmmessungen während der Betriebserprobung

Während der Betriebserprobung wurden sechs Messungen am Zugverband mit innovativen Güterwagen und Referenzwagen durchgeführt, um den Verlauf des Vorbeifahrpegels über die Laufleistung und damit die langfristige Wirksamkeit der lärmindernden Komponenten zu untersuchen [2].

Im Wesentlichen konnten die Ergebnisse aus den Typentests im Jan/Feb 2018 in der Erprobung bestätigt werden (Tabelle 2-2). Alle Vorbeifahrpegel der innovativen Güterwagen lagen bei den Typentests als auch bei der Betriebserprobung deutlich unter dem Grenzwert (Tabelle 2-3).

Bei den innovativen Kesselwagen, Containertragwagen und Flachwagen konnten über die Laufleistung keine bedeutenden Veränderungen des Vorbeifahrpegels beobachtet werden. Nur beim innovativen Autotransportwagen wurde über die Laufleistung ein minimaler Anstieg des Vorbeifahrpegels festgestellt. Insgesamt ist die Wirksamkeit der lärmindernden Komponenten Bonatrans Radsatz mit Ringelement und Luchini Radsatz mit Syope Absorber über eine Laufleistung von 100.000 km als gut zu beurteilen.

Bei den innovativen VTG Kesselwagen erwies sich der beladene Kesselwagen als leiser als der unbeladene.

Im Rahmen der Betriebserprobung traten sowohl bei den Innovativen Güterwagen als auch bei den Referenzwagen vereinzelt Flachstellen auf, deren negativen akustischen Auswirkungen den positiven Effekt der lärmindernden Maßnahmen bei weitem überstiegen. Da für diese Flachstellen aus betrieblicher Sicht keine Ausstellungs- oder Ausbesserungspflicht bestand, ist ein Fazit der Untersuchungen von PROSE, dass nicht nur der Einsatz von lärmindernden Komponenten für eine langfristige Lärmsenkung im Schienengüterverkehr erforderlich ist, sondern auch geeignete Maßnahmen zur Vermeidung sowie frühzeitigen Detektion von Flachstellen identifiziert und in den Betrieb gebracht werden müssen.

Tabelle 2-2: Zusammenfassung der Messergebnisse - Maximale Vorbeifahrpegel (von 80 km/h und 100 km/h)

	Kesselwagen		Containertragwagen		Autotransportwagen		Flachwagen		
	Referenzwagen (halbbeladen+leer)	Innovativer Wagen (halbbeladen+leer)	Referenzwagen (halbbeladen+leer)	Innovativer Wagen (halbbeladen+leer)	Referenzwagen dreiviertelbeladen+leer	Referenzwagen dreiviertelbeladen+leer	Referenzwagen halbbeladen+leer	Innovativer Wagen halbbeladen+leer	
Anzahl Achsen	4	4	4	4	4	4	6	6	
Länge über Puffer	14.92	14.40	25.94	25.94	31.00	33.00	16.40	16.40	
APL	0.268	0.278	0.154	0.154	0.129	0.121	0.366	0.366	
$L_{pAeq, Tp}$ [dB(A)] (Grenzwert)	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	83.0	
$L_{pAeq, Tp}$ (80 km/h, APL_{ref}) [dB(A)] (Maximum von 80 und 100 km/h)	PCW01 (Januar/Februar)	83.3	78.1	82.7	76.4	86.9	78.9	82.4	76.4
	DW01 (April)	83.2	78.0	85.3	76.5 ^d	83.2	79.4 ^c	80.3	76.0
	DW02 (Mai)	84.2	78.6	84.4	75.6 ^{cd}	81.6 ^b	80.5 ^b	79.5	76.6
	DW03 (Juni)	86.9 ^a	77.8	84.2	76.0	80.3 ^b	80.0 ^b	78.9	75.0
	DW04 (Juli)	84.3	78.1	86.1	76.1	82.1	81.9 ^c	78.8	75.8
	PCW02 (Oktober)	87.2 ^a	76.7	88.7 ^a	77.4	80.2	79.8 ^c	79.7	74.7
	DW05 (Januar)	84.3	80.2	81.8	76.7	78.6	77.3	79.1	74.3
Mittelwerte (DW)	84.0	78.2	84.3	76.4	81.0	79.8	79.4	75.6	
Differenz Mittelwerte (IGW - Ref)		-6		-8		-1		-4	
Differenz Mittelwerte zu TSI Grenzwert		-5		-7		-3		-7	

a: Flachstelle (nicht in Mittelung einbezogen), b: Einzelwagenauswertung, c: Pegel der Fahrt mit 80 km/h, d: halbbeladen/beladen

Tabelle 2-3: Lärmpegel im Vergleich zum TSI Grenzwert von 83 dB(A)

	Bereich über alle Konfigurationen (gemessen in PCW I)	Gewählte Konfiguration für Betriebserprobung und PCW II (gemessen in PCW I)	Betriebserprobung (Mittelwert)
Innovativer Kesselwagen	-4 bis -7 dB	-5 dB	-5 dB
Innovativer Containertragwagen	-5 bis -7 dB	-7 dB	-7 dB
Innovativer Autotransportwagen	-3 bis -4 dB	-4 dB	-3 dB
Innovativer Flachwagen	-6 bis -7 dB	-7 dB	-7 dB

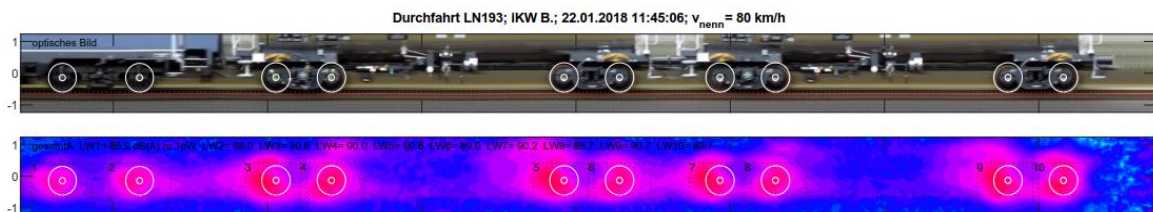
2.3 Ergebnisse Schallmessungen mit Hilfe der akustischen Kamera

Im Frühjahr 2018 wurden alle Wagentypen hinsichtlich ihrer Schallabstrahlung auf dem Testring PCW in Wildenrath untersucht [3]. Bei Güterwagen ist das Fahrgeräusch das primäre Bewertungskriterium für die Zulassung sowie die Berechnung der Streckenschallemission, welches über den Vorbeifahrpegel in 7.5m Entfernung zum Gleis bestimmt wird. Die Analyse eines einzelnen Mikrofonsignals lässt jedoch nur Aussagen über Pegelzeitverlauf und Frequenzanteile zu. Für eine räumliche Zuordnung und Detektion der beteiligten Schallquellen am Güterwagen müssen spezielle bildgebende Verfahren mittels sogenannter akustischer Antenne, technisch Mikrofonarray oder besser bekannt als "akustische Kamera" angewandt werden.

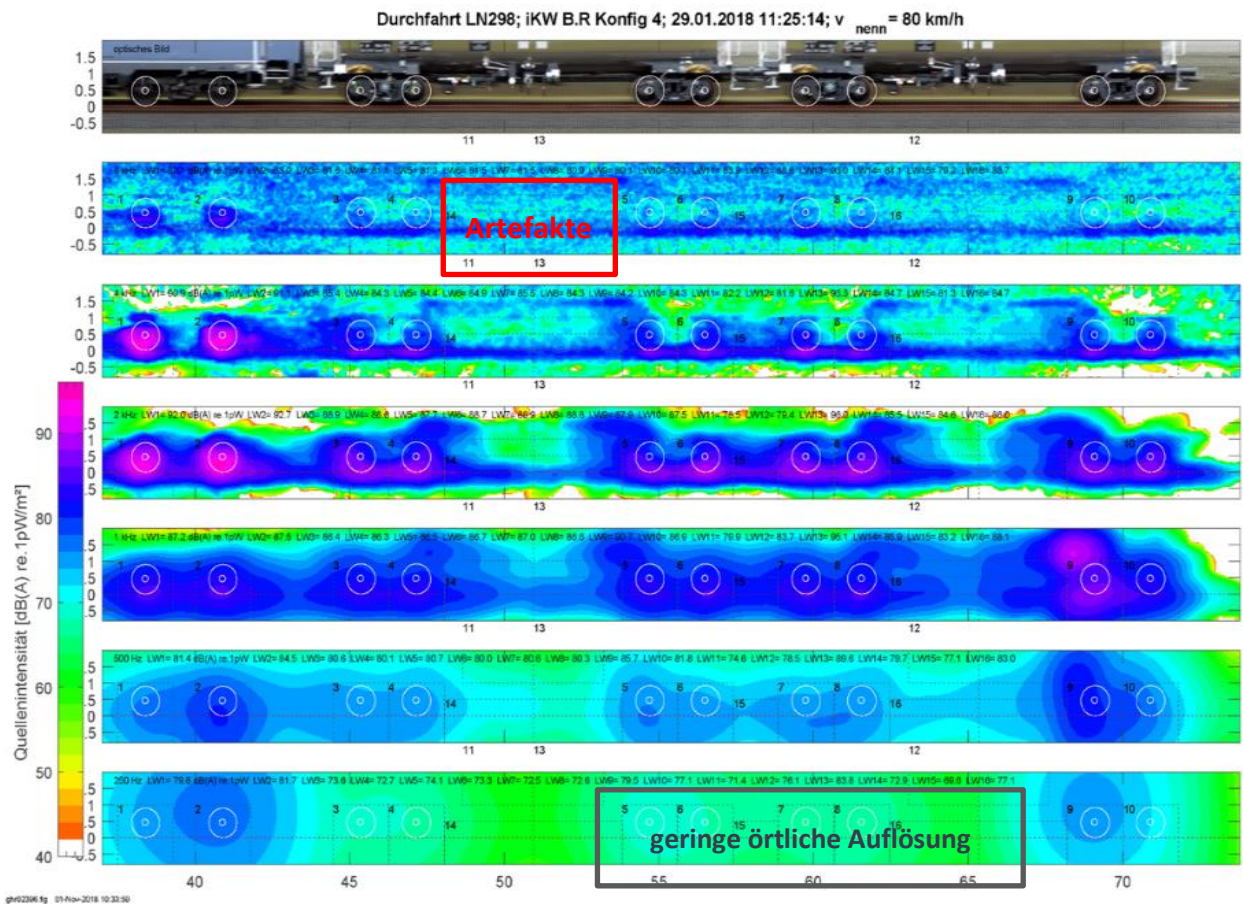
Bei den Vorbeifahrmessungen wurde hierzu ein Mikrofonarray Bionic-L mit 112 Einzelmikrofonen in einer sternförmigen Anordnung verwendet. Durch die unterschiedlichen örtlichen Positionen der Mikrofone trifft der Schallanteil einer Schallquelle durch die konstante Schallausbreitungsgeschwindigkeit von 340 m/s zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf die Einzelmikrofone am Array ein. In der Nachverarbeitung kann man durch zeitliches Verschieben der einzelnen Signale, dem sogenannten "Sum & Delay Beamforming", die Schallquellen des Messobjekts wieder reproduzieren und damit "akustische Bilder" erzeugen.

Bei einem stehenden Objekt ist diese Methode relativ einfach möglich, während dies bei bewegten Objekten aufgrund der kurzen Messdauer sehr aufwändig ist. Die Vorbeifahrdauer eines Kesselwagens bei 120 km/h beträgt weniger als 0.5 Sekunden. PROSE hat für diese Anwendung ein Verfahren entwickelt, bei dem die Auswertung über eine mitschwenkende Mittelung erfolgt, um zu vermeiden, dass die schnell bewegten Schallquellen im Bildbereich des Arrays wie z.B. die Räder nicht verzerrt in den Farbkarten dargestellt werden.

Bei Typentests wird der Vorbeifahrpegel $L_{pAeq,Tp}$ stets als A-bewerteter Schalldruckpegel in dB(A) angegeben. Die Auswertung der "akustischen Bilder" vom Mikrofonarray kann gleichermaßen in dB(A) durchgeführt werden, wie im nachfolgenden Beispiel am Kesselwagen exemplarisch dargestellt. Das Fahrgeräusch bei Güterwagen wird demnach hauptsächlich durch den Bereich Rad-Schiene verursacht, was auch den allgemein anerkannten Theorien zur Schallentstehung bei Schienenfahrzeugen entspricht.

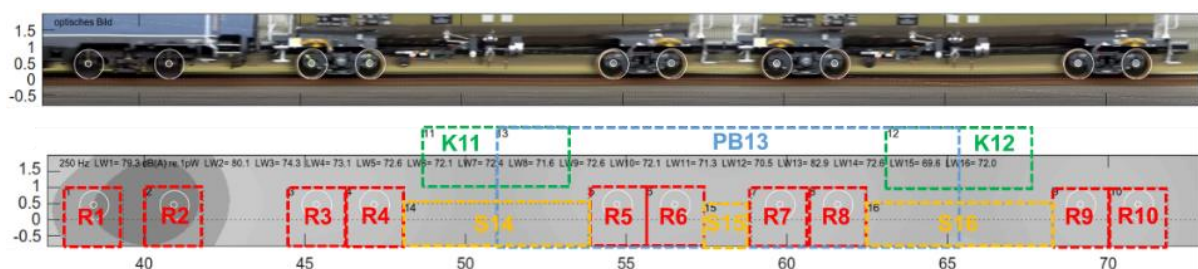


Akustische Kameras haben technologische Einschränkungen, die von dem jeweiligen Mikrofonarray, der Anzahl der Mikrofone, der Anordnung der Mikrofone und der Signalaufzeichnung abhängen. Die Dynamik und örtliche Auflösung in den akustischen Bildern ist begrenzt und hängt umgekehrt proportional zusammen. Weiter ist die örtliche Auflösung akustischer Kameras frequenzabhängig, d.h. Schallquellen mit tiefen Frequenzen werden nur unscharf dargestellt, während bei höheren Frequenzen die Auflösung der Schallquellen besser ist, jedoch mit zusätzlichen Artefakten gestört wird.



Um die beschränkte Dynamik bei dem gewählten Auswerteverfahren von ca. 20 dB optimal zu nutzen bei gleichzeitig hoher Auflösung, wurden die Analysen nacheinander in sechs verschiedenen Oktavbändern von 250 Hz bis 8 kHz durchgeführt. Durch Kenntnis der beteiligten Schallquellen am Güterwagen und deren Frequenzanteile kann daran ein objektiver Vergleich der gemessenen Varianten erfolgen. Die Farbkarten sind im Anhang A aufgeführt und je Wagentyp mit einer gleichen Skalierung erstellt, sodass ein Vergleich zwischen den Varianten möglich ist.

Das Interpretieren von Farbkarten über die einfache Betrachtung hat leider auch Grenzen, daher wurden in einem weiteren Schritt die Schallleistungspegel L_w für die relevanten Teilschallquellen ausgelesen. Dies geschieht durch Integration der Quellenintensitäten über die interessierenden Flächenbereiche wie Radsätze, Schienenstücke, Kessel oder Wagenaufbauten und der für den Vorbeifahrpegel wirksame Bereich von Wagenmitte zu Wagenmitte, der sogenannten Vorbeifahrfläche, integriert werden.



Die ermittelten Schallleistungspegel jeder gemessenen Variante und Geschwindigkeit können anschliessend mit den Referenzwagen oder untereinander verglichen werden. In Tabelle 2-4 sind einerseits die Schallleistungspegel L_w der Teilschallquellen (R5-R10, K11, K12, S14-S15) und die Vorbeifahrfläche PB13 aus den Farbkarten der Arraybilder enthalten und andererseits werden die relevanten Komponenten in der Vorbeifahrfläche (R5..8, K11,12; S14-16) über eine

Flächengewichtung zusammengefasst. Werden alle wesentlichen Teilschallquellen in der Vorbeifahrfläche berücksichtigt, so sind die Schallleistungspegel der Vorbeifahrfläche PB13 und TEL gleich. Die Spalten "Delta Ref TSI 83 dB(A)" zeigen den Pegelunterschied der jeweiligen gemessenen Variante gegenüber dem Referenzgüterwagen mit einem Vorbeifahrpegel 83 dB(A).

Tabelle 2-4 Schallleistungspegel des IGW Kesselwagens B.R. mit Bonatrans Rädern und Ringelementen bei 80 km/h

dB(A)	VTG KW				80 km/h				LpAeq,Tp,80				LpAeq,Tp				80.6 dB(A)				Vorbeifahrfläche				Delta Ref TSI 83 dB(A)			
	R5	R6	R7	R8	R9	R10	K11	K12	PB13	S14	S15	S16	R5..8	K11,12	S14-16	TEL	R5-8	K11,12	S14-16	TEL	R5-8	K11,12	S14-16	TEL				
298 B.R.																												
Lw'	86.4	86.9	87.2	86.8	88.6	86.6	78.6	79.7	83.0	82.2	85.4	83.3	86.9	79.2	84.2	83.1												
Lw	92.0	92.5	92.8	92.4	94.2	92.1	87.9	89.1	101.0	91.5	88.9	92.6	98.4	94.6	94.6	101.0	-7.9	-5.3	-6.4	-7.1								
8 kHz	81.3	81.5	81.5	80.9	80.1	80.1	83.9	83.6	93.1	84.1	79.2	83.7	87.3	89.7	85.5	92.6	-6.0	-4.9	-4.8	-5.2								
4 kHz	84.4	84.9	85.5	84.3	84.2	84.3	82.2	81.6	93.3	84.7	81.3	84.7	90.8	88.0	87.1	93.7	-10.3	-9.1	-8.0	-9.6								
2 kHz	87.7	88.7	88.9	88.8	87.9	87.6	78.5	79.4	96.0	85.5	84.6	86.1	94.6	85.0	89.7	96.1	-6.9	0.7	-6.3	-6.5								
1 kHz	86.5	86.7	87.0	86.6	90.7	86.9	79.9	83.7	95.1	85.9	83.2	88.1	92.7	88.2	89.1	95.3	-8.2	0.9	-6.4	-6.9								
500 Hz	80.7	80.0	80.6	80.3	85.7	81.8	74.6	78.5	89.6	79.7	77.1	83.0	86.4	83.0	83.2	89.3	-6.3	-5.5	-5.2	-5.8								
250 Hz	74.1	73.3	72.5	72.6	79.5	77.1	71.4	76.1	83.8	72.9	69.6	77.1	79.2	80.3	76.2	83.7	-3.4	-2.4	-3.3	-3.0								

Bei allen gemessenen Güterwagentypen dominiert das Rollgeräusch mit Anteilen von Rädern und Schiene den Gesamtschall im Vorbeifahrpegel. Allerdings sind Besonderheiten und Tendenzen zu beobachten und es zeigt Ansätze für eine weitere Lärminderung an den Fahrzeugen.

Bei Kesselwagen und BraCoil bestimmen die Schallquellen im Bereich der Radsätze den Gesamtschall, während bei den Containertragwagen und Autotransportern die Bereiche Radsätze und Schienenstücke zu gleichen Anteilen in den Gesamtschall eingehen.

Der Kessel der gemessenen Kesselwagen strahlt selbst kaum Schall ab, reflektiert jedoch das Rollgeräusch aus dem Drehgestell zur Seite hin. Nach diesen Erkenntnissen kann das Gesamtgeräusch von Kesselwagen nur über eine weitere Reduktion des Rad-Schiene Schalls und eine wirksame Vermeidung seitlicher Reflexionen vom Kessel erfolgen. So könnten die Drehgestelle z.B. nach oben geschlossen gestaltet werden oder mit Radhäusern ähnlich wie beim Automobil ausgestattet werden. Eine absorbierend beschichtete Kesseloberfläche im Bereich über dem DG kann seitliche Reflexionen wirksam vermeiden.

Bei unbeladenen CTW und BraCoil geht vom Wagenaufbau kein relevanter Schallanteil aus, sodass eine weitere Vorbeifahrpegelreduktion nur über Massnahmen realisiert werden können, die den Rad-Schiene Schall weiter reduzieren.

Bei Autotransportern können insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten mit 120 km/h bedeutende Schallanteile durch den Wagenaufbau beobachtet werden. Durch zusätzliche Dämpfung in der Stahlrahmenkonstruktion und schallabsorbierende Schichten im Bereich der Radsätze kann die Schallabstrahlung noch geringfügig reduziert werden.

3 Energieverbrauchsmessungen

Im Januar und Februar 2018 (Messkampagne PCW I) sowie im Oktober 2018 (Messkampagne PCW II) wurden auf dem Testring Wildenrath der Siemens AG (PCW) Energieverbrauchsmessungen durchgeführt [4]. Der Energieverbrauch der vier innovativen Güterwagentypen (Containertragwagen und Kesselwagen der Firma VTG, sowie Flachwagen und Autotransporter der Firma DB Cargo) wurde mit dem Energieverbrauch von Referenzwagen derselben Gattung verglichen.

Dazu wurde die mechanische Zugkraft der untersuchten Wagen mit Hilfe einer instrumentierten Messschraubenkupplung während der beiden Testkampagnen im PCW ermittelt. Aus der Zugkraft und der gefahrenen Geschwindigkeit wurde der Energieverbrauch der Wagen bei konstanter Fahrt in der Ebene berechnet. Dabei wurde der Energieverbrauch in der Geraden und im Bogen gesondert betrachtet. Für die Containertragwagen und die Kesselwagen wurde zusätzlich das Lenkverhalten untersucht, da diese innovativen Wagentypen über Drehgestelle mit einstellbaren Radsätzen verfügen, welche das Laufverhalten begünstigen und den Energieverbrauch im Bogen reduzieren.

In der Geraden ist der innovative Kesselwagen geringfügig effizienter als der Referenzwagen (-1.7% bezogen auf maximaler Zuladung) und im Bogen deutlich effizienter (-6.7%). Der innovative Containerwagen (Gerade -6.2%, Bogen -9.2%) und der innovative Flachwagen (Gerade -9.1%, Bogen -7.2%) haben eine deutlich bessere Energieeffizienz als deren Referenzfahrzeuge, bezogen auf die maximale Zuladung. Dabei profitiert der innovative Flachwagen besonders von seiner hohen Zuladungskapazität.

Der innovative Autotransporter hingegen hat eine schlechtere Energieeffizienz als der Referenzautotransporter (Gerade +2.1%, Bogen +6.5% bezogen auf maximaler Zuladung). Der Grund dafür liegt in der längeren und damit auch schwereren Ausführung des innovativen Autotransporters. Dafür kann der innovative Autotransporter variabler (mit mehreren verschiedenen Autotypen) beladen werden, sodass mit dem innovativen Autotransporter eine höhere Auslastung der Beladung und weniger Leerfahrten zu erwarten sind. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird zeigen, ob der innovative Autotransporter schlussendlich nicht doch effizienter ist als der Referenzwagen.

Bezogen auf das Gesamtgewicht bei maximaler Zuladung ist der absolute Energieverbrauch des innovativen Flachwagens und des innovativen Autotransporters deutlich höher als bei deren Referenzwagen, aufgrund des höheren Gesamtgewichts dieser beiden innovativen Wagengattungen.

Da die Messergebnisse aus dem PCW nur Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit beinhalten, wurde mit Hilfe der ermittelten Fahrzeugwiderstände für jeden Wagentyp eine virtuelle Fahrt mit einem realen Fahrprofil simuliert, um die Beschleunigungsenergie und die Auslastung ebenfalls in der Energieberechnung zu berücksichtigen. Wenn die Wagen weniger stark ausgelastet sind, wird prozentual ein größerer Anteil der Traktionsenergie für die Fortbewegung der Eigenmasse des Wagens benötigt. Dies verursacht eine Abnahme der Energieeffizienz bei geringerer Auslastung (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Energieersparnis (Referenz - IGW) berechnet aus virtueller Fahrt in Relation zum Gewicht des transportierten Guts

Wagengattung (Vergleich in % von kWh/tkm)	100% Auslastung			50% Auslastung			Mittelwert
	10% Bögen	50% Bögen	Mittelwert	10% Bögen	50% Bögen	Mittelwert	
Containertragwagen	-2.3	-2.7	-2.5	-1.9	-2.3	-2.1	-2.3
Kesselwagen	-2.2	-2.9	-2.6	-1.2	-1.7	-1.4	-2.0
Flachwagen/BraCoil*	-3.5	-3.1	-3.3	-0.2	0.2	0.0	-1.7
Autotransporter	4.3	5.3	4.8	7.8	8.9	8.3	6.6

4 Bremsmessungen mit und ohne EP-Light Bremse

Eine konventionelle pneumatische Bremse wird durch einen pneumatischen Steuerdruck angelegt bzw. gelöst. Sobald der Lokführer Steuerdruck anlegt, breitet sich der Druckpegel im gesamten Zugverband aus, sodass sich die Bremse löst. Wenn der Steuerdruck abfällt, wird die Bremse angelegt. Da sich der Steuerdruck über den gesamten Zug ausbreiten muss, kommt das Steuersignal mit einer Zeitverzögerung, proportional zum Abstand von der Lokomotive, bei den Wagen an. Je länger der Zug, desto länger die Zeitverzögerung. Deshalb löst der Lokführer eine Standard-Bremung bereits frühzeitig aus. Da auch das Lösen der Bremsen mit einer Zeitverzögerung behaftet ist, muss der Lokführer die Bremsen frühzeitig lösen, um die Zielgeschwindigkeit nicht zu unterschreiten. Eine Unterschreitung der Zielgeschwindigkeit führt zu einem erhöhten Energieverbrauch, wenn unmittelbar nach dem Bremsvorgang wieder auf eine betrieblich freigegebene, höhere Geschwindigkeit beschleunigt wird.

Bei einer vollständig elektrisch betätigten pneumatischen Bremse (ep-Bremse) ist die pneumatische Steuerdruckleitung mit einer elektrischen Steuerleitung überlagert. Die Bremszylinder werden dann über das elektrische Steuersignal angesprochen (die pneumatische Steuerleitung ist eine redundante Notfallsteuerung). Durch die elektrische Ansteuerung der Bremsen wird die Zeitverzögerung beim Anlegen und beim Lösen minimiert. Dadurch kann die Zielgeschwindigkeit beim Bremsen genauer erreicht werden, sodass nach dem Bremsvorgang nicht auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt werden muss bzw. bei Abbruch des Bremsvorgangs von einer höheren Geschwindigkeit auf die Soll-Geschwindigkeit beschleunigen kann, da die Bremsen sofort lösen. Auf diese Weise wird Beschleunigungsenergie gespart.

Da die ep-Bremse einiges an Elektronik erfordert, ist es finanziell attraktiver, eine ep-Light-Bremse zu installieren. Bei der ep-Light-Bremse wird das Anlegen der Bremse elektrisch ausgelöst, indem der Steuerdruck in jedem Wagen durch ein elektrisch betätigtes Ventil abgelassen wird. Dadurch liegt eine ep-Light-Bremse deutlich schneller an als eine konventionelle pneumatische Bremse. Das Lösen der ep-Light-Bremse erfolgt hingegen nicht elektrisch, sondern wie bei einer konventionellen pneumatischen Bremse durch den pneumatischen Druckaufbau in der Steuerleitung. Dadurch ist die Zeitverzögerung beim Anlegen der Bremse minimiert, aber beim Lösen der Bremse unverändert lang im Vergleich zu einer konventionellen pneumatischen Bremse. Dafür ist die Installation einer ep-Light-Bremse deutlich kostengünstiger als eine vollständige ep-Bremse.

Mit der ep-Light-Bremse ist die Zielgeschwindigkeit genauer zu erreichen als mit der konventionellen pneumatischen Bremse, sodass nach dem Bremsvorgang nicht auf die Zielgeschwindigkeit beschleunigt werden muss. Im Vergleich zur vollständigen ep-Bremse entfällt allerdings der Vorteil, dass die Bremse schnell gelöst werden kann, wenn die Bremsung abgebrochen werden soll. Somit kann mit einer ep-Light-Bremse im Vergleich zur pneumatischen Bremse nur durch das genauere Erreichen der Zielgeschwindigkeit Energie gespart werden.

Der Effekt der ep-Light-Bremse auf den Energieverbrauch wurde in Abhängigkeit der Zuglänge untersucht und mit dem Energieverbrauch unter Einsatz einer konventionellen pneumatischen Bremse verglichen. Dabei wurde nur der Einfluss betriebsbedingter Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit mit anschließender Geschwindigkeitserhöhung betrachtet.

Im Oktober 2018 (Messkampagne PCW II) wurden auf dem Testring Wildenrath der Siemens AG (PCW) und während den Fahrten der Betriebserprobung auf der «Nordschleife» im November Bremsmessungen mit und ohne EP-Light durchgeführt [5].

Im PCW wurden verschiedene Bremsungen unter reproduzierbaren Bedingungen mehrmals wiederholt. Ferner wurde mit verschiedenen Zugkompositionen gebremst. Während der Betriebserprobung wurden sechs Schleifen gefahren. Die Bremsungen wurden kategorisiert und für jede Kategorie die Anzahl Bremsungen über alle Fahrten ermittelt.

Für jede Bremsung wurde ermittelt, wie genau die Soll-Geschwindigkeit nach der Bremsung erreicht wurde. Je genauer die Soll-Geschwindigkeit nach einer Bremsung erreicht wird, desto weniger Energie wird benötigt, um anschließend auf eine höhere Soll-Geschwindigkeit zu beschleunigen. Genau hierin liegt das Energiesparpotenzial der ep-Light-Bremse.

Bei einer leichten und kurzen Zugkomposition wird die Soll-Geschwindigkeit nach der Bremsung mit und ohne ep-Light selbst bei scharfen Bremsbedingungen ähnlich genau erreicht. Bei einer schwereren und längeren Zugkomposition waren die Bremsungen während der Messungen im PCW mit ep-Light um 3 km/h bis 4 km/h genauer als ohne. Allerdings waren die Bremsanforderungen extrem, denn während der Betriebserprobung waren die Bremsungen mit ep-Light im Schnitt nur um 1 km/h genauer als ohne.

Sowohl für die Konfiguration im PCW als auch für die Betriebserprobung wurde die Energieersparnis aus der Bremsgenauigkeit berechnet. Die Energieersparnis aufgrund der ep-Light-Bremse gegenüber einer konventionellen pneumatischen Bremse liegt in der Praxis zwischen 0.15 % und 0.43 %, wobei 0.15 % deutlich realistischer ist als 0.43 %, da die Bremsbedingungen in der Praxis eher den Bedingungen bei der Betriebserprobung als denen im PCW entsprechen.

5 Übersicht der Berichte

- [1] *Innovative Güterwagen - Akustik - Investigativ*
PROSE Berlin GmbH, Bericht Nr. 02-01269 1.00, 13. August 2018

- [2] *Innovative Güterwagen - Lärmmessung Betriebserprobung*
PROSE GmbH, Bericht Nr. 02-01321 2.00, 6. Juni 2019

- [3] *Innovative Güterwagen - Array-Messungen*
PROSE Berlin GmbH, Bericht Nr. 02-01325 3.00, 28. Februar 2019

- [4] *Innovative Güterwagen - Energieverbrauchsmessung*
PROSE Berlin GmbH, Bericht Nr. 02-01389 2.00, 29. März 2019

- [5] *Innovative Güterwagen - ep-Light Bremse*
PROSE Berlin GmbH, Bericht Nr. 02-01394, 14. März 2019