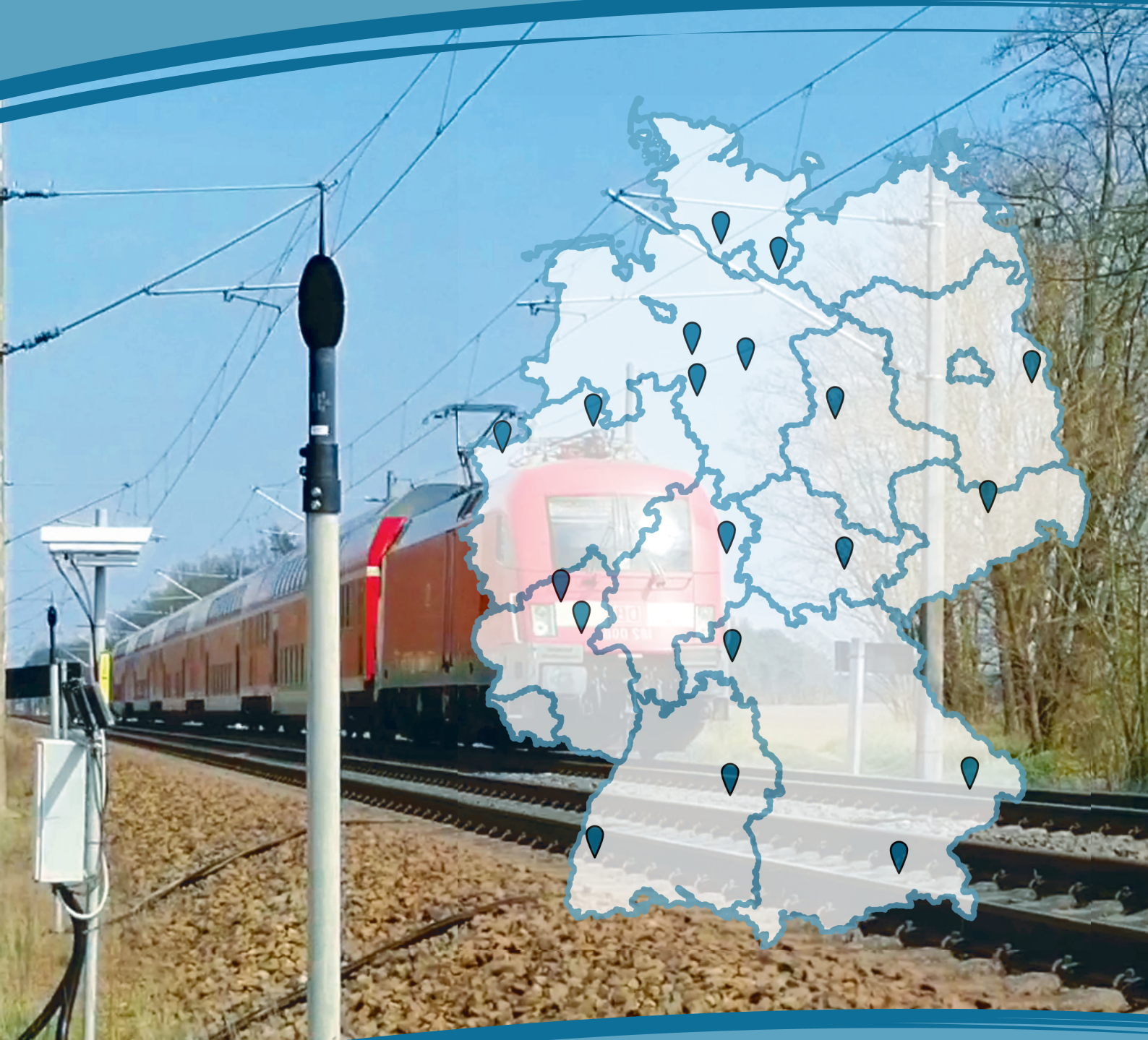




Jahresbericht 2021



Lärm-Monitoring
Schallmessungen im Schienenverkehr

Impressum

HERAUSGEBER

Eisenbahn-Bundesamt
Heinemannstraße 6
53175 Bonn

www.eba.bund.de

ERSTELLUNG DES BERICHTS

Dr. rer. nat. Nathan Isert

Prof. Dr. Stefan Lutzenberger

Müller-BBM Rail Technologies GmbH
Helmut-A.-Müller-Straße 1 - 5
82152 Planegg bei München

Dr. rer. nat. Henning Brammer

Christoph Jöckle

Referat 52 - Umwelt

EDITOR - TITELBLATT

Mithat Serbest

BILDNACHWEIS

Eisenbahn-Bundesamt

PUBLIKATION ALS PDF

www.laerm-monitoring.de

KONTAKT

Telefon: 0228 / 9826 – 540

E-Mail: laerm-monitoring@eba.bund.de

Bonn, November 2022

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Zusammenfassung	3
3	Einleitung	5
4	Messstationen	6
5	Verwendete Messgrößen	8
6	Messergebnisse	11
1	Anhang: Messkonzept	41
2	Anhang: Messgrößen	43
3	Anhang: Fehlerbetrachtung, Genauigkeitsbetrachtung, Messunsicherheiten	46
4	Anhang: Kennzahlen 2021	49
5	Anhang: Schienenrauheit und Abklingrate 2021	54
6	Anhang: Literatur	112

2 Zusammenfassung

Mit dem Lärm-Monitoring werden Schallemissionen aus dem Schienenverkehr kontinuierlich und einheitlich erfasst. Initiiert und finanziert wird das Lärm-Monitoring durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Ziel ist es, den Erfolg der zahlreichen Aktivitäten zum Lärmschutz, wie z. B. die Umrüstung der Güterwagen auf lärmarme Bremstechniken, zu überwachen. Im Jahr 2021 haben die 19 Messstationen entlang des deutschen Schienennetzes Zugvorbeifahrten mit einer Verfügbarkeit von 98,4 Prozent aufgezeichnet. Mit dem vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse des Lärm-Monitorings für das Jahr 2021 dargestellt.

Auf Basis der Messergebnisse können folgende wesentliche Aussagen getroffen werden:

- Die Schallemissionen in Form von Mittelungspegeln, gemessen in einem Abstand von 7,5 Meter, liegen zwischen 62,7 dB(A) und 72,1 dB(A). Im Vergleich zu 2019 sind die Mittelungspegel an allen Messstationen um bis zu 4,5 dB(A) reduziert. Insbesondere an Messstationen mit höheren Pegeln konnte eine deutliche Reduktion gemessen werden. Selbst an Messstationen, an denen der Verkehr zugenommen hat, gingen die Schallemissionen zurück.
- Insgesamt sind es weiterhin Güterzüge, die an den Messstationen die wesentlichen Geräuschquellen darstellen. Sie verursachten etwa 76 Prozent der gemessenen Gesamtemission. Im Jahr 2019 betrug der Anteil an der Gesamtemission noch 90 Prozent. Die Reduktion der Mittelungspegel ist auf die Reduktion der Emissionen aus dem Güterverkehr zurückzuführen.
- Wesentlich für den Rückgang der Schallemissionen ist die Umrüstung der Güterwagen von Grauguss-Bremssohlen auf Rollgeräusch-reduzierende Verbundstoff-Bremssohlen bzw. die Neuanschaffung von Güterwagen, die der TSI Lärm [1] entsprechen. Mit dieser Umrüstung bzw. Neubeschaffung wird die Schallemission eines Güterwagens um etwa 10 dB(A) reduziert. Seit Juni 2019 stieg der Anteil an Güterwagen, welche als lärmarm¹ und somit als definitiv umgerüstet klassifiziert wurden, von 59 Prozent auf im Mittel 87 Prozent im Jahr 2021. Die von Güterwagen verursachte mittlere Emission ging in diesem Zeitraum um ca. 7 dB(A) zurück.
- Der Einsatz lauter Güterwagen ist seit dem 13.12.2020 verboten. Die Bremsausstattung der Güterwagen wird durch das Eisenbahn-Bundesamt im Rahmen von Kontrollen des Schienenlärmschutzgesetzes regelmäßig überprüft. Im Jahr 2021 waren fast alle (99,7 Prozent) der überprüften Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen bzw. Scheibenbremsen ausgestattet (siehe [Jahresbericht Schienenlärmschutzgesetz](#)). Auch die Ergebnisse des Lärm-Monitorings belegen, dass im Dezember 2021 fast alle Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen ausgestattet waren (vgl. Abschnitt 6.5). Die teilweise gemessenen lautereren Pegel werden u. a. von akustisch ungünstigen Fahrzeugzuständen verursacht.

¹ Als lärmarm werden die Güterwagen bezeichnet, welche einen Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq,T,APL,80}$ von 86 dB(A) nicht überschreiten, da Güterwagen mit Grauguss-Bremssohlen grundsätzlich größere Vorbeifahrtpegel aufweisen. Für Neuzulassungen von Güterwagen nach TSI Lärm liegt der bei Abnahmemessungen einzuhaltende Grenzwert bei 83 dB(A). Bei Messungen im realen Betrieb können Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen diesen Wert jedoch übersteigen, ohne dabei den Vorgaben der TSI Lärm zu widersprechen, z. B. wenn der akustische Gleiszustand nicht den hohen Vorgaben der Abnahmemessung entspricht. Details in Abschnitt 5.4.

Weitere Messdaten, welche in Echtzeit aktualisiert werden, können auf der Internetseite www.laerm-monitoring.de abgerufen werden.

3 Einleitung

Mit dem netzweiten Lärm-Monitoring stellt die Bundesregierung den langfristigen Trend des Schienenverkehrslärms transparent und nachvollziehbar dar. Hierfür wurden entlang des Schienennetzes Messstationen errichtet, die nach einheitlicher Methode den Schallemissionspegel (Maß für die Lautstärke) vorbeifahrender Züge messen. 19 Messstationen im Netz erfassen mehr als zwei Drittel des gesamten Schienengüterverkehrs.

Das Lärm-Monitoring erfasst Schallemissionen über einen längeren Zeitraum und wertet die gewonnenen Daten statistisch aus. Damit können Aussagen zur zeitlichen Entwicklung der Schallemissionen gemacht werden – also ob der Schienenverkehr z. B. durch die Umrüstung der Güterwagen auf leise Bremssohlen tatsächlich leiser geworden ist.

Das Lärm-Monitoring ermöglicht unter anderem die Überprüfung, ob das am 13. Dezember 2020 in Kraft getretene Verbot des Betriebs lauter Güterwagen (Schienenlärmenschutzgesetz) den erwarteten Effekt bringt – eine deutliche Reduktion der Schallemissionen des Schienenverkehrs.

Die Messungen werden im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes von Müller-BBM Rail Technologies GmbH durchgeführt. Initiiert und finanziert wird das Lärm-Monitoring durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr mit dem Ziel, den Erfolg der zahlreichen Aktivitäten zum Lärmschutz, wie z. B. die Umrüstung der Güterwagen auf lärmarme Bremstechniken, zu überwachen.

Das Lärm-Monitoring erfolgt gemäß der E DIN 38452-1:2020-03; Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen – Teil 1: Emissionen; Entwurf März 2020 [2] mit der Qualitätsstufe 3.

Für diesen Bericht wurden die Messergebnisse aus dem Jahr 2021 ausgewertet und aufbereitet. Auf der Internetseite www.laerm-monitoring.de können die Messergebnisse im Einzelnen eingesehen werden. In Echtzeit sind die Pegelschriebe der Messstationen sowie die Daten zu den Zugvorbeifahrten verfügbar. Die Mittelungspegel werden ebenfalls regelmäßig veröffentlicht. Einen Monat nach der Messung stehen die Daten der Zugvorbeifahrten sowie die Mittelungspegel auch zum Download zur Verfügung. Dieser Zeitraum wird für die Überprüfung der Messdaten benötigt.

4 Messstationen

4.1 Messtechnik

Für jedes Gleis ist ein Mikrofon zur Messung der Schallemissionen normgerecht [2] in 7,5 Meter Entfernung zur Gleismitte und 1,2 Meter über Schienenoberkante installiert. Alle in diesem Bericht genannten akustischen Kenngrößen beziehen sich auf diesen Abstand. Aus den Signalen der im Gleis verbauten Sensoren werden Zeitpunkt und Geschwindigkeit der Zugvorbeifahrten bestimmt. Details zum Messaufbau befinden sich in Anhang 1.

4.2 Messstandorte

Die Standorte der Messstationen wurden auf Basis einer Auswertung der Verkehrsströme ermittelt, so dass ein hoher Anteil insbesondere des Güterverkehrs erfasst wird. Güterzüge sind zurzeit die dominante Schallquelle im Schienenverkehr. Die Messstationen wurden so im Schienennetz positioniert, dass sie mehr als zwei Drittel des in Deutschland verkehrenden Güterzugverkehrs erfassen.

Darüber hinaus sollen die Messungen nicht von der Umgebung beeinflusst werden. Insbesondere dürfen sie nicht von Schallreflexionen an Flächen in der Umgebung gestört werden. Genauso sollen Hintergrundgeräusche die Messungen nicht beeinträchtigen. Deshalb stehen die Messstationen grundsätzlich nicht neben Gebäuden oder in lärmintensiven Umgebungen.

Die Art des Infrastrukturaufbaus beeinflusst die Entstehung und Ausbreitung des Schalls. Deshalb wurden Standorte gewählt, die einen Standardoberbau aufweisen (i. d. R. Schiene E60, Betonschwelle B70 und Schotter) und auf einem geraden Streckenabschnitt liegen, in dem keine Lärmschutzmaßnahmen vorgenommen wurden.

Die Verteilung der Messstandorte ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

4.3 Wagenscharfe Messung

Eisenbahnfahrzeuge werden anhand der detektierten Achsvorbeifahrten unterschieden. Den Wagen wird der Vorbeifahrtpegel, der während der Zeit der Vorbeifahrt von Puffer zu Puffer gemessen wird, zugeordnet. Dies ist eine solide Datenbasis für die im Bericht durchgeführten statistischen Auswertungen. Im Einzelfall kann die Schallemission eines benachbarten lauten Güterwagens die Messung eines leisen Wagens beeinflussen.

Zudem werden mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera und automatischer Schrifterkennung mittels künstlicher Intelligenz die Wagennummern bestimmt. Dies ermöglicht tiefergehende statistische Auswertungen (siehe Abbildung 17).

Durch die Umrüstung der Güterwagen und den insgesamt niedrigeren Vorbeifahrtpegel treten die durch Flachstellen bzw. Raddefekte verursachten klopfenden Geräusche vermehrt in den Fokus. Die hierdurch verursachten Schallemissionen werden bereits vom Lärm-Monitoring erfasst, können jedoch nicht gesondert ausgewiesen werden. Für die Zukunft wird geprüft, inwiefern solche Auffälligkeiten in Verbindung mit den dazugehörigen Defekten erfasst und einzelnen Wagen bzw. Achsen zugeordnet werden können.

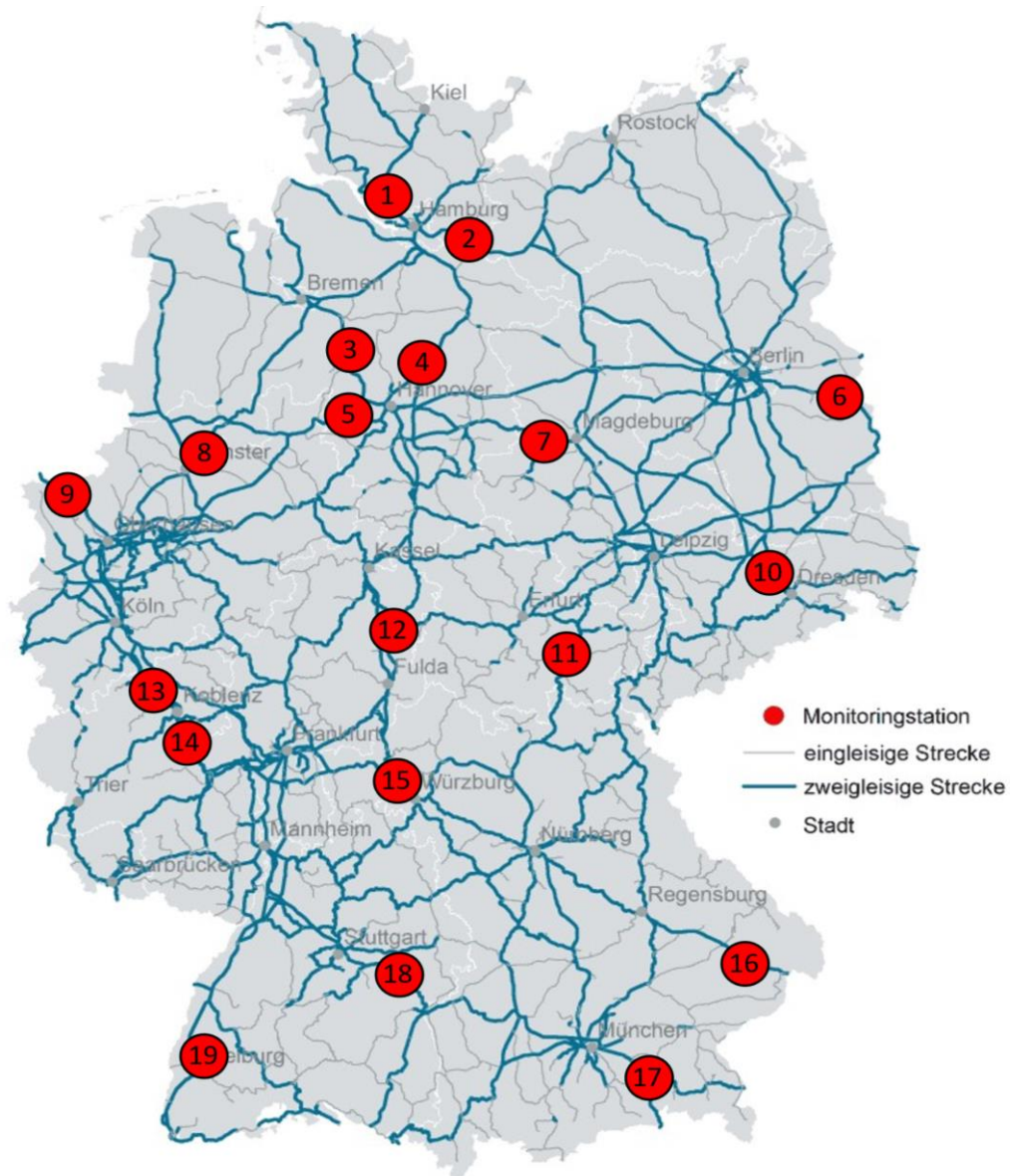


Abbildung 1: Standorte der Messstationen

Nr.	Standorte der Lärmessstationen	Nr.	Standorte der Lärmessstationen
1	Elmshorn, Strecke 1220: Hamburg – Kiel	11	Saalfeld, Strecke 6305: Großheringen – Saalfeld
2	Schwarzenbek, Strecke 6100: Berlin – Hamburg	12	Bad Hersfeld, Strecke 3600: Bebra – Fulda
3	Nienburg, Strecke 1740: Wunstorf – Bremen	13	Andernach, Strecke 2630: Köln – Bingen
4	Celle, Strecke 1720: Lehrte – Hamburg	14	Lahnstein, Strecke 3507: Koblenz – Wiesbaden
5	Stadthagen, Strecke 1700: Hannover – Minden	15	Karlstadt, Strecke 5200: Würzburg – Aschaffenburg
6	Fürstenwalde, Strecke 6153: Berlin – Guben	16	Osterhofen, Strecke 5830: Regensburg – Passau
7	Eilsleben, Strecke 6110: Braunschweig – Magdeburg	17	Rosenheim, Strecke 5510: München – Rosenheim
8	Telgte, Strecke 2200: Wanne-Eickel – Hamburg	18	Göppingen, Strecke 4700: Stuttgart – Ulm
9	Emmerich, Strecke 2270: Oberhausen – Emmerich (Grenze)	19	Emmendingen, Strecke 4000: Mannheim – Basel
10	Radebeul, Strecke 6248: Berlin – Dresden		

Tabelle 1: Standortbeschreibung der Messstationen

5 Verwendete Messgrößen

Das Lärm-Monitoring erfasst die Schallemissionen aus dem Schienenverkehr, zeigt aber – soweit das möglich ist – auch die Ursachen der Emissionen auf.

5.1 Entstehung der Schallemissionen

Die wichtigste Schallquelle im Schienenverkehr ist das Rollgeräusch. Andere Geräusche, wie Aggregatgeräusche oder aerodynamische Geräusche, spielen bei den typischen Geschwindigkeiten an den Messstationen eine nachgeordnete Rolle.

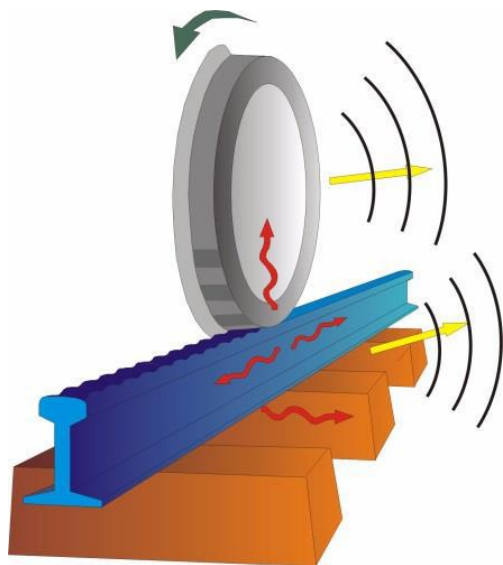


Abbildung 2: Schall- und Erschütterungserzeugung verursacht durch ein rollendes Rad mit Rundheitsabweichungen auf einer Schiene mit Riffeln (Quelle: TNO)

Der Entstehungsprozess des Rollgeräusches kann in Anregung und Abstrahlung unterteilt werden (siehe Abbildung 2). Die Anregung findet am Rad-Schiene-Kontakt statt: Da sowohl das Rad als auch die Schiene nicht perfekt glatt, sondern rau sind, bewegen sich Rad und Schiene während des Abrollens zueinander. Je nachdem, wie schnell dies passiert, werden verschiedene Eigenfrequenzen von Rad und Schiene angeregt – sowohl Rad als auch Schiene beginnen zu schwingen. Diese Komponenten übertragen einen Teil der Schwingungsenergie an die Luft – und strahlen somit den Schall ab.

Je schneller das Rad abrollt, desto mehr Energie ist in der relativen Schwerpunktbewegung vorhanden und desto mehr Schall wird emittiert.

Eine größere Anzahl von vorbeifahrenden Rädern führt zu einer Zunahme der Schallemission.

5.2 Schallpegel

Abbildung 3 zeigt einen typischen Pegelschrieb über eine gewisse Zeitdauer. In diesem sind die wichtigsten Pegelgrößen exemplarisch dargestellt.

In den **Mittelungspegel** gehen Stärke und Dauer jedes Einzelgeräusches während eines bestimmten Bezugszeitraums (z. B. ein Monat) ein. Pegelspitzen werden durch ihre hohe Intensität und die energetische Mittelung besonders stark berücksichtigt. Für die Bestimmung des Mittelungspegels wird die Schallenergie aller Zugvorbeifahrten im Bezugszeitraum zusammengerechnet und durch die

Dauer des Bezugszeitraums geteilt. Er ist für die Zeiträume Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr), Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr des Folgetages) und 24 Stunden berechnet.

Der Mittelungspegel beschreibt den Schall über lange Zeiträume und ist gesetzlich für die Bewertung verankert, da alle wesentlichen Einflussgrößen (Anzahl der Züge bzw. Achsen, die Fahrgeschwindigkeit, die Beschaffenheit des Rollmaterials und die Beschaffenheit des Gleises) in den Mittelungspegel eingehen.

Der **Vorbeifahrtexpositionspegel** (engl. Transit Exposure Level, *TEL*) gibt den mittleren Schalldruckpegel während einer einzelnen Vorbeifahrt an. Die Länge des Zuges hat kaum Einfluss. Rechnerisch kann der geschwindigkeitsnormierte Vorbeifahrtexpositionspegel berechnet werden, den der Zug bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h gehabt hätte (siehe Anhang 2.5). Auf Basis des sogenannten *TEL80* können die Schallemissionen verschiedener Züge miteinander verglichen werden.

Der **Maximalpegel** gibt den größten Pegelwert während einer Zugvorbeifahrt an.

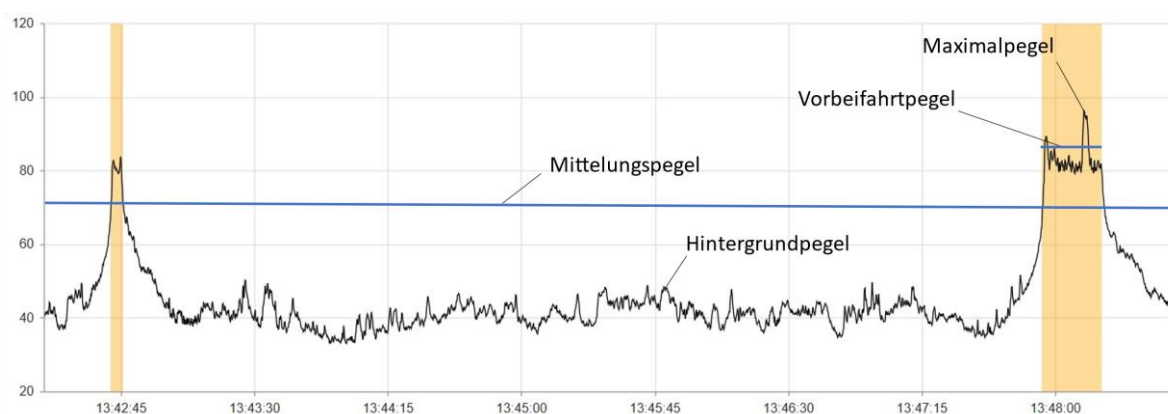


Abbildung 3: Mittelungs-, Vorbeifahrt-, Maximal- und Hintergrundpegel am Beispiel einer Zugvorbeifahrt an der Messstation Rosenheim.

5.3 Gleiszustand

Für die Beschreibung des akustischen Gleiszustands werden zwei Größen gemessen: Die **Rauheit** der Schienenfahrflächen (Schienenrauheit), welche zusammen mit der Rauheit der Räder die Anregung des Rollgeräusches bestimmt, sowie die **Gleisabklingrate**. Letztere beschreibt die Dämpfung von Schwingungen im Gleis und wirkt sich auf die Schallabstrahlung der Schiene/des Gleises aus.

5.4 Rollmaterial

Für die Betrachtung des akustischen Einflusses des Rollmaterials wird der geschwindigkeitsgewichtete Schallereignispegel *TEL80* verwendet, da dieser den Einfluss von Geschwindigkeit und Zuglänge minimiert und Zugvorbeifahrten untereinander vergleichbar macht. Nicht eliminiert werden kann hingegen der Einfluss des Gleises, so dass dieser bei der Betrachtung der Werte verschiedener Messstationen berücksichtigt werden muss.

Für Güterwagen wird der Begriff **lärmarm** verwendet, wenn deren auf 80 km/h korrigierter und auf den jeweiligen APL (Achsen pro Länge) bezogene Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq, Tp, APL, 80}$ den Wert von 86 dB(A) nicht überschreitet. Für Neuzulassungen von Güterwagen nach TSI Lärm (2014) [1] liegt der bei Abnahmemessungen einzuhaltende Grenzwert bei 83 dB(A) – und wird bei den Abnahmemessungen

durch die Verwendung von Verbundstoff-Bremssohlen bzw. Scheibenbremsen eingehalten. Bei Messungen im realen Betrieb können Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen diesen Wert jedoch übersteigen, ohne dabei den Vorgaben der TSI Lärm zu widersprechen, z. B. wenn der akustische Gleiszustand nicht den hohen Vorgaben der Abnahmemessung entspricht. Da mit Grauguss-Bremssohlen ausgestattete Güterwagen grundsätzlich einen Vorbeifahrtpegel von mehr als 86 dB(A) aufweisen, werden Güterwagen mit einem Vorbeifahrtpegel von 86 dB(A) oder kleiner als lärmarm bezeichnet.

6 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse des Lärm-Monitorings dargestellt. Für einen ersten Überblick sind in Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 einzelne Kenngrößen für alle 19 Messstationen zusammen dargestellt. Hierbei bestimmt sich der Beurteilungspegel L_m aus Formel (7) im Anhang: Messgrößen wobei über alle Schallexpositionen summiert und mit der Anzahl eingehender Messstationen gewichtet wurde. Damit hat jede Zugvorbeifahrt den selben Einfluss auf den Mittelungspegel. Stationen mit niedrigen Zugvorbeifahrten werden somit nicht überrepräsentiert. Insgesamt haben die Zugzahlen leicht zugenommen, wobei die mittlere Anzahl von Achsen pro Zug als auch die mittlere Zuglänge und Geschwindigkeit konstant bleiben. Der Mittelungspegel L_m nahm im Vergleich zu 2019 um 3,5 dB(A) ab.

Jahr	Zug-kategorie	L_m [dB(A)]	Züge pro Tag	mittl. Achsen pro Zug	mittl. Zuglänge [m]	mittl. Geschw. [km/h]
2019	Alle	73,1	3490	60	317	109
2020	Alle	71,0	3575	59	317	110
2021	Alle	69,6	3786	61	321	109

Tabelle 2: Tagesmittelwerte des Mittelungspegels L_m , Zugzahlen, mittlerer Achszahlen, Zuglängen und Zuggeschwindigkeiten als Mittel über alle Zugkategorien und alle 19 Messstationen.

Spezifisch ausgewertet für alle Güterzüge (Tabelle 3) ergibt sich ein vergleichbares Bild wie für den gesamten Zugverkehr aus Tabelle 2. Die durch die Güterzugvorbeifahrten verursachten Mittelungspegel sanken von 2019 bis 2021 um 4,1 dB(A).

Jahr	Zug-kategorie	L_m [dB(A)]	Züge pro Tag	mittl. Achsen pro Zug	mittl. Zuglänge [m]	mittl. Geschw. [km/h]
2019	GZ	72,6	1561	101	494	89
2020	GZ	70,2	1584	102	504	90
2021	GZ	68,5	1750	103	505	90

Tabelle 3: Tagesmittelwerte des L_m , Zuzahlen, mittlerer Achszahlen, Zuglängen und Zuggeschwindigkeiten als Mittel über alle Güterzüge und alle 19 Messstationen.

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte für die Personenzüge angegeben. Auch hier sind die Zugzahlen leicht zunehmend über die Jahre. Durch die geringere mittlere Achszahl pro Zug ergibt sich insgesamt aber eine vergleichbare Gesamtachszahl. Die Pegelwerte der Personenzüge sind über die Jahre vergleichbar geblieben. Insgesamt sind die verzeichneten Minderungen aus Tabelle 2 auf die Umrüstung der Güterwagen zurückzuschreiben.

Jahr	Zug-kategorie	L_m [dB(A)]	Züge pro Tag	mittl. Achsen pro Zug	mittl. Zuglänge [m]	mittl. Geschw. [km/h]
2019	PZ	63,1	1805	27	175	127
2020	PZ	63,0	1881	26	172	128
2021	PZ	63,0	1918	25	168	127

Tabelle 4: Tagesmittelwerte des L_m , Zuzahlen, mittlerer Achszahlen, Zuglängen und Zuggeschwindigkeiten als Mittel über alle Personenzüge und alle 19 Messstationen.

Angaben zu den Kennzahlen an den einzelnen Stationen finden sich in Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2. Die Messergebnisse zu den akustischen Gleiseigenschaften sowie zum Rollmaterial sind in Kapitel 6.3 und Kapitel 6.4 bzw. Anhang 5 dargestellt.

6.1 Schallemissionen an den Messstandorten

In Abbildung 4 ist der Mittelungspegel L_m bezogen auf einen Zeitraum von 24 Stunden für alle Messstandorte für die Jahre 2019 bis 2020 (hellblau) und 2021 (blau) graphisch dargestellt (für weitere Kennzahlen hierzu siehe Anhang 4). Die Werte repräsentieren die Schallemission eines gesamten Jahres. Wie alle akustischen Kenngrößen dieses Berichts wurde der Mittelungspegel in einem Abstand von 7,5 Meter zur Gleismitte bestimmt.

Standorte mit hohem Verkehrsaufkommen weisen meist höhere Mittelungspegel auf als solche mit weniger Verkehr. Ausschlaggebend für den Mittelungspegel sind aber noch weitere Faktoren. Die Art des Rollmaterials (Personen- bzw. Güterzüge) und dessen Zustand haben oft den größten Einfluss auf den Mittelungspegel. Zusätzlich spielen die Fahrgeschwindigkeit und auch der Zustand des Gleises eine Rolle.

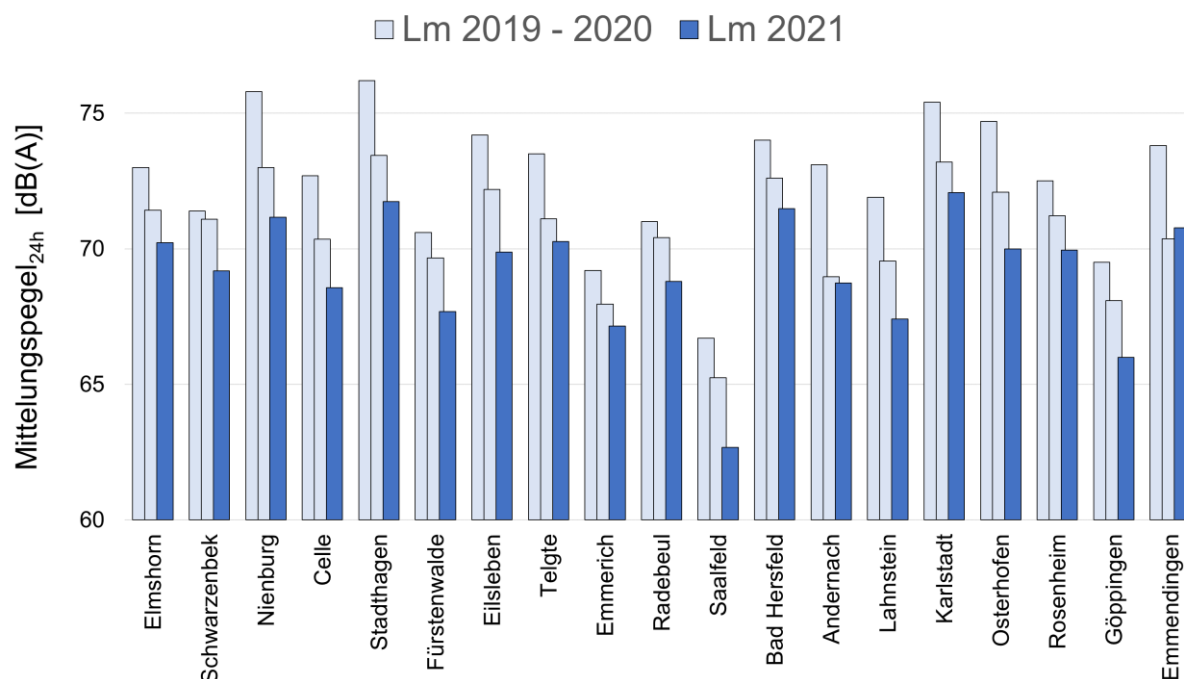


Abbildung 4: Mittelungspegel $L_{m, 24h}$ an allen Messstationen im Vergleich der Jahre 2019 bis 2020 (hellblau) und 2021 (blau)

Im Jahr 2021 lagen die Mittelungspegel zwischen 62,7 dB(A) und 72,1 dB(A). Im Vergleich zum Jahr 2019² sind die Schallemissionen aus dem Schienenverkehr an allen Messstandorten zurückgegangen. Insbesondere an Messstationen mit höheren Mittelungspegeln ist ein deutlicher Rückgang der Werte zu verzeichnen.

² Die Messstationen sind zwischen April und November 2019 in Betrieb genommen worden. Je nach Inbetriebnahmedatum bilden die Mittelungspegel für das Jahr 2019 somit lediglich einen Zeitraum aus der zweiten Hälfte oder gegen Ende des Jahres 2019 ab.

Dies ist im Wesentlichen auf die Umrüstung der Güterwagen auf rollgeräuschminimierende Verbundstoffbremssohlen zurückzuführen (vgl. Kapitel 5.4).

Der Anteil des Güterverkehrs an der Gesamtemission ist entsprechend rückläufig und lag im Jahr 2021 bei 76 Prozent, 14 Prozentpunkte niedriger als noch 2019. Dessen ungeachtet blieben Güterzüge die dominante Geräuschquelle im Schienenverkehr, wie Abbildung 5 entnommen werden kann. Hier ist der oben bereits dargestellte gesamte Mittelungspegel $L_{m, 24h}$ (blau) mit den Mittelungspegeln $L_{m, GZ}$ (gelb) bzw. $L_{m, PZ}$ (grün) dargestellt, die sich ergeben, wenn ausschließlich Personen- bzw. Güterzugvorbeifahrten berücksichtigt werden. Herauszuheben ist die Messstation Elmshorn, an der im Jahr 2021 die Personenzüge einen größeren Anteil an der Gesamtemission als die Güterzüge hatten. An dieser Messstation ist der Anteil an Güterzügen gering im Vergleich zu Personenzügen. Trotzdem waren in der Vergangenheit die Schallemissionen der Güterzüge dominant. Die allgemeine Reduktion der Schallemissionen aus dem Güterverkehr hat nun hier zu einer Verschiebung der dominanten Schallquelle geführt.

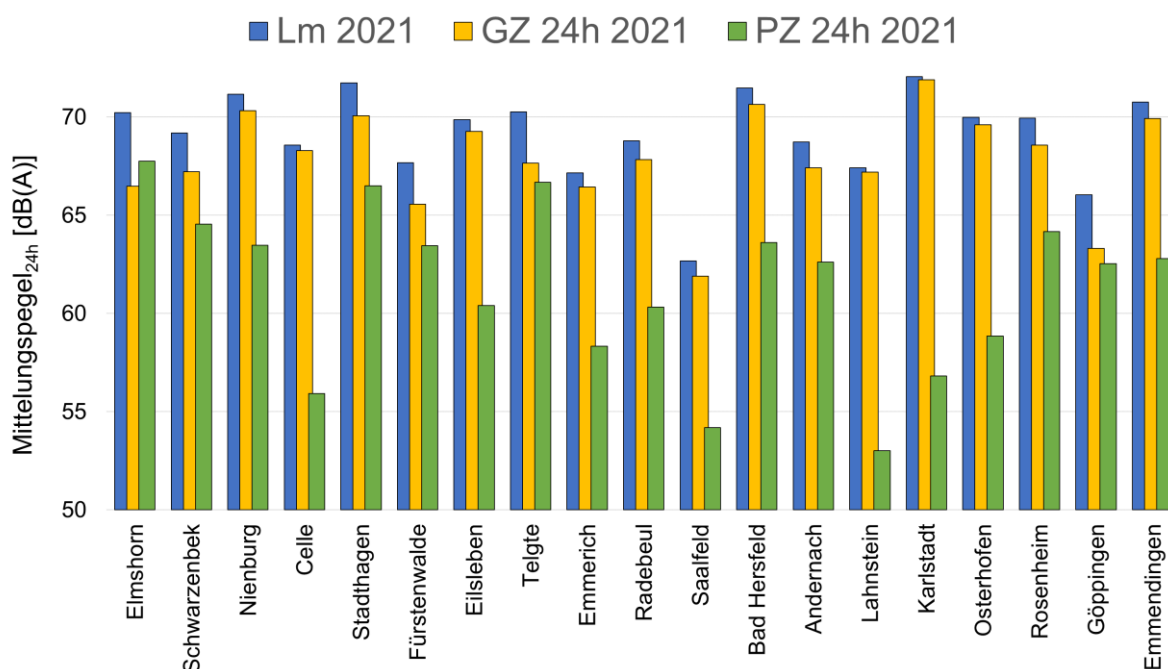


Abbildung 5: Gesamter Mittelungspegel für das Jahr 2021 $L_{m, 24h}$ (blau) pro Messstation zusammen mit den von Güter- und Personenzügen verursachten Mittelungspegeln $L_{m, GZ}$ (gelb) bzw. $L_{m, PZ}$ (grün).

In den vier nachfolgenden Abbildungen Abbildung 6 bis Abbildung 9 sind die Mittelungspegel der Jahre 2019 bis 2021 an den 19 Messstationen jeweils getrennt nach Zeitraum Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) sowie Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) und Zugkategorie (Personen- bzw. Güterzug) graphisch miteinander verglichen. Zusätzlich werden die Zuganzahl, Achszahl, mittlere Zuglänge und Geschwindigkeit für alle Zugfahrten dargestellt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Mittelungspegel der Personenzüge für Tag- und Nachtzeitraum im Vergleich zu den Pegeln der Vorjahre keinem Trend folgen. Veränderungen sind oft anhand der dargestellten Parameter zu erklären. Steigt z. B. die Anzahl der Züge, so steigt der Pegel, während eine niedrigere Geschwindigkeit zu kleineren Pegeln führt. Auch die akustischen Gleisparameter (siehe Abschnitt 6.3) haben Einfluss auf die Pegel.

Die Mittelungspegel der Güterzüge haben hingegen in der Fläche abgenommen. Dies kann auf das leisere Rollmaterial der umgerüsteten Güterwagen zurückgeführt werden.

Auf die Änderungen an den einzelnen Messstationen wird im folgenden Kapitel 6.2 genauer eingegangen.

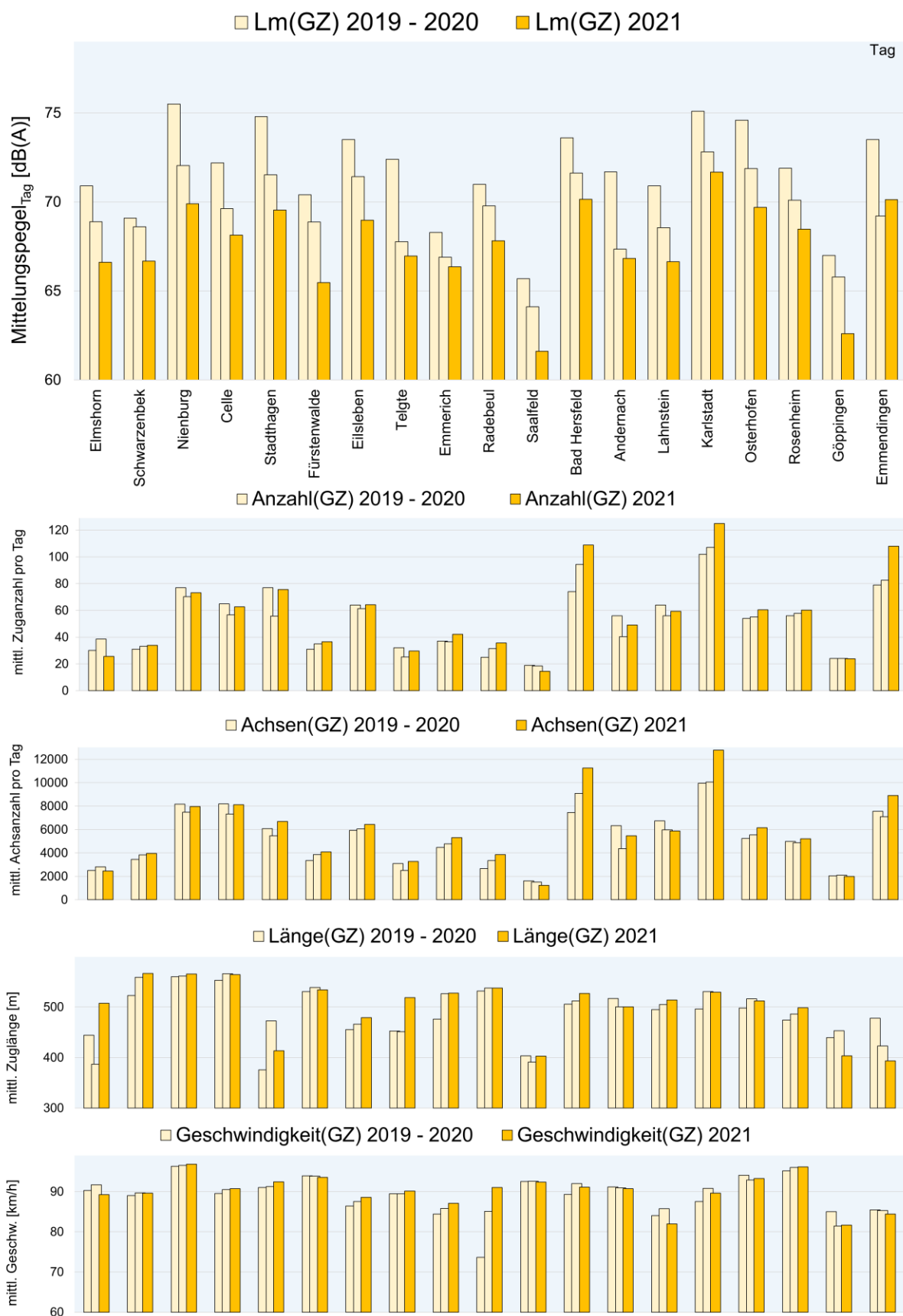


Abbildung 6: Mittelungspegel, Zuganzahl, Achszahl, Zuglänge und Geschwindigkeit für den Zeitraum Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) für Güterzüge. Unterteilt für das Jahr 2019 bis 2020 (hellgelb) und 2021 (gelb).

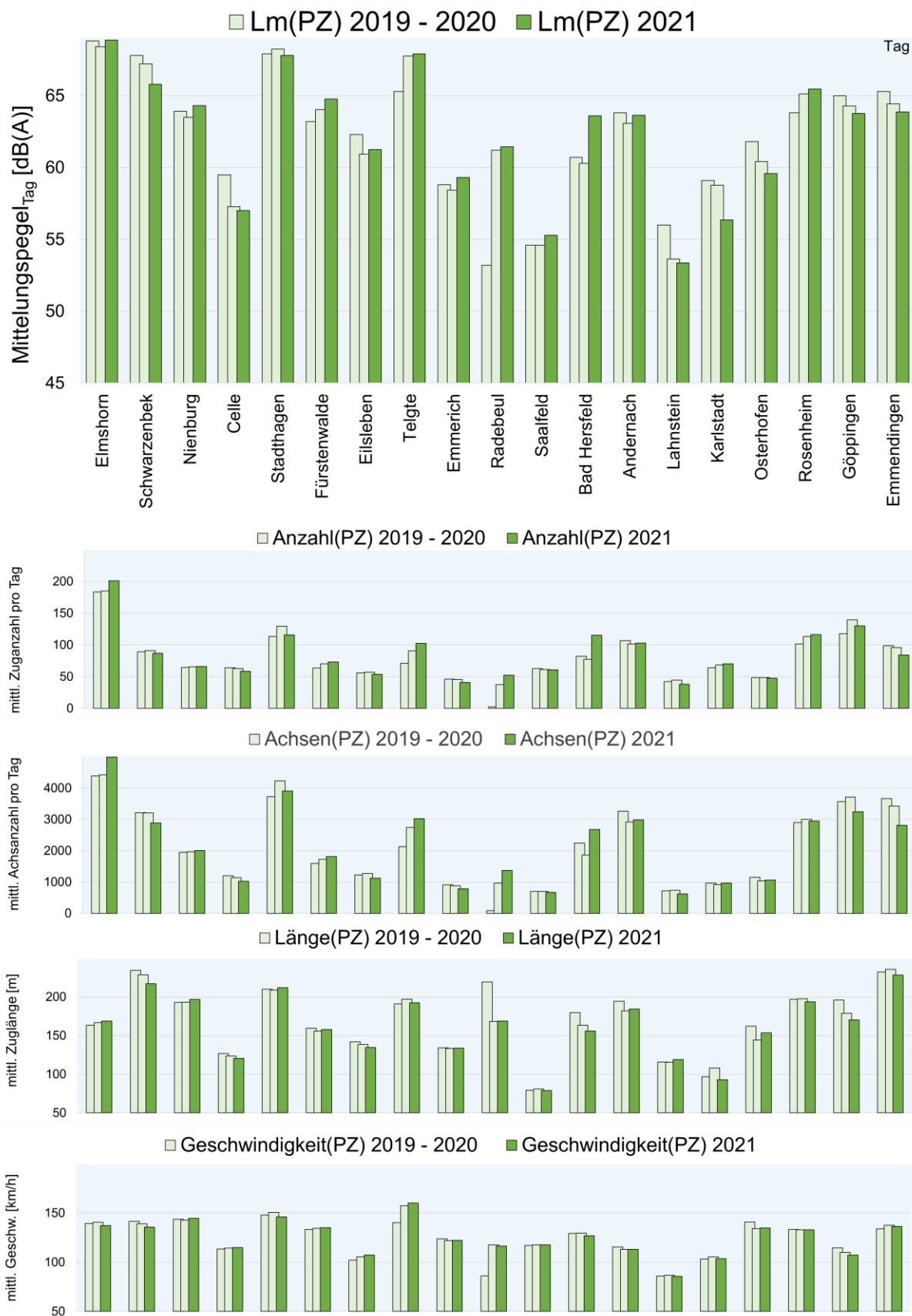


Abbildung 7: Mittelungspegel, Zuganzahl, Achsanzahl, Zuglänge und Geschwindigkeit für den Zeitraum Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) für Personenzüge. Unterteilt für das Jahr 2019 bis 2020 (hellgrün) und 2021 (grün).

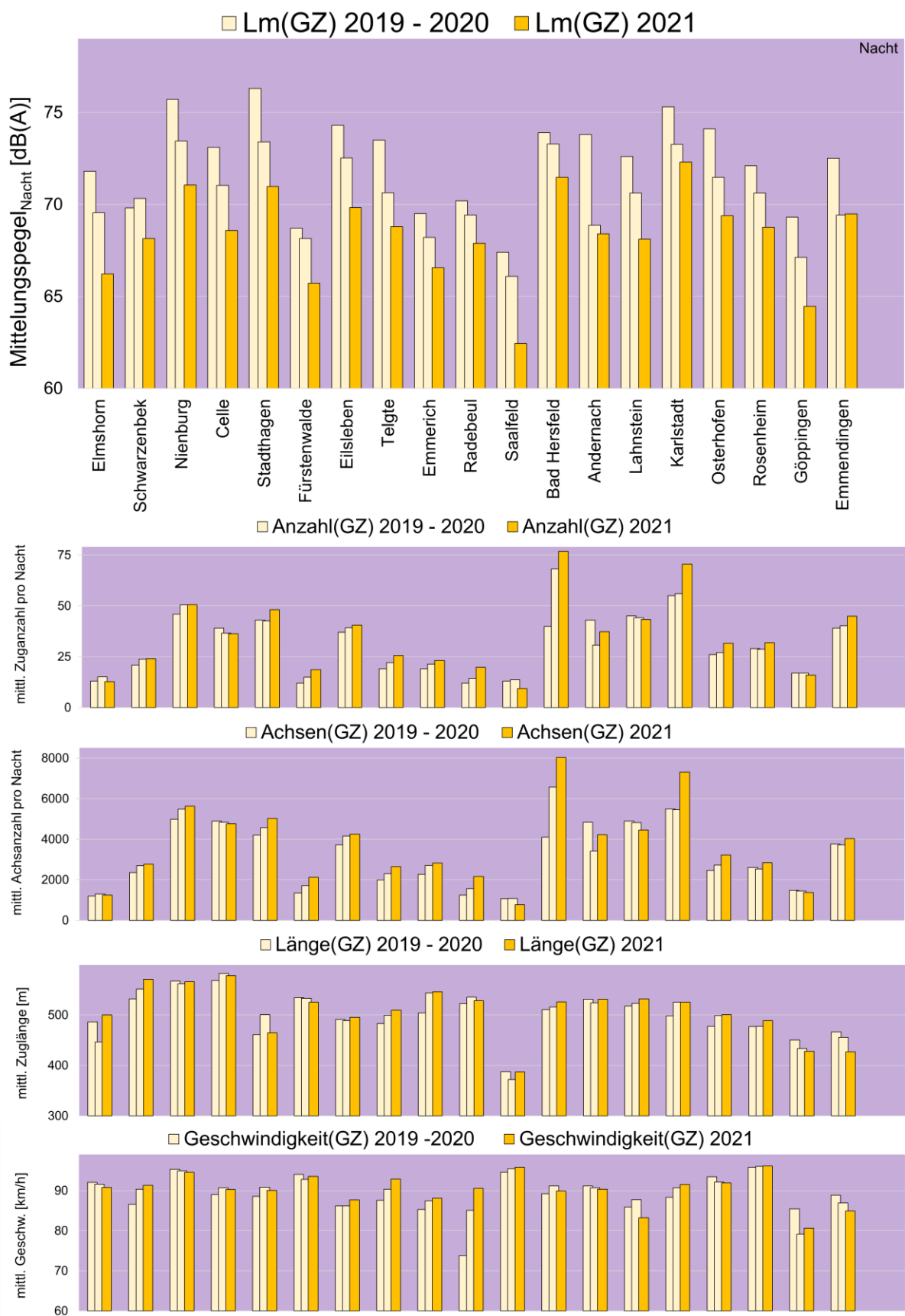


Abbildung 8: Mittelungspegel, Zuganzahl, Achszahl, Zuglänge und Geschwindigkeit für den Zeitraum Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) für Güterzüge. Unterteilt für das Jahr 2019 bis 2020 (hellgelb) und 2021 (gelb).

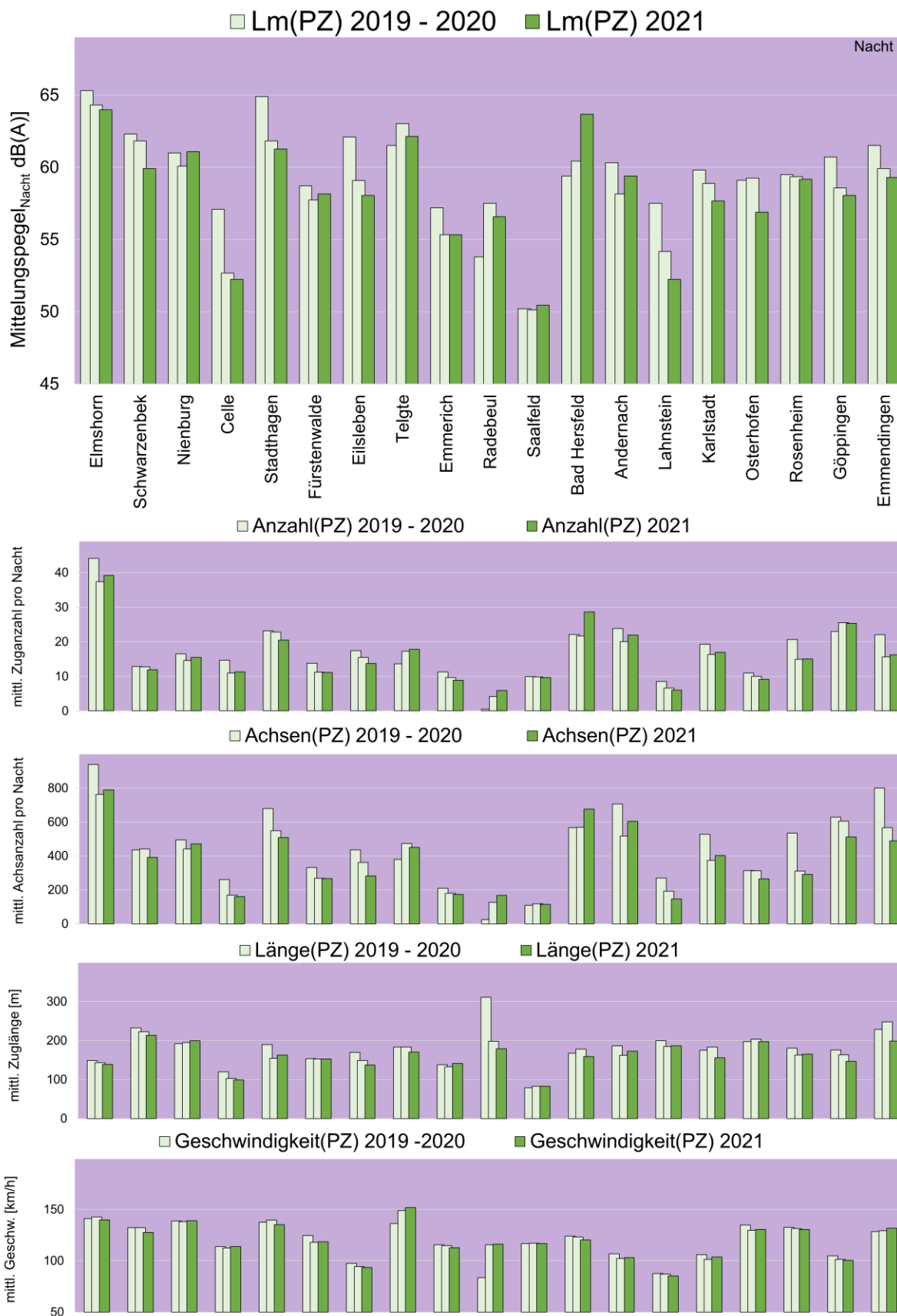


Abbildung 9: Mittelungspegel, Zuganzahl, Achsanzahl, Zuglänge und Geschwindigkeit für den Zeitraum Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) für Personenzüge. Unterteilt für das Jahr 2019 bis 2020 (hellgrün) und 2021 (grün).

6.2 Kurzbeschreibung der Messstandorte

An den einzelnen Messstandorten stellt sich die Situation wie folgt dar:

ELMSHORN

An der Lärm-Monitoringstation Elmshorn hat sich der gemessene Mittelungspegel für das Jahr 2021 im Vergleich zu 2019 um etwa 3 dB(A) reduziert. Dabei hat sich der Verkehr in Anzahl und Zusammensetzung nicht wesentlich verändert. Weiterhin haben die Personenzüge mit über 86 Prozent den größten Anteil am Gesamtverkehr. Dies ist bundesweit der höchste Anteil von Personenzügen am Gesamtverkehr. Trotzdem ist die Pegelreduzierung der Umrüstung der Güterwagen zuzuschreiben. An der Messstation wurden im Jahresmittel etwa 80 Prozent der verkehrenden Güterwagen als lärmarm identifiziert. Dies liegt zwar weiterhin unter dem bundesweiten Mittel von 87 Prozent. Jedoch stieg der Anteil lärmarrer Güterwagen im Vergleich zum Jahr 2019 um 28 Prozentpunkte und zum Jahr 2020 um 11 Prozentpunkte. Durch den hohen Anteil an Personenzügen und den hohen Umrüstgrad der Güterwagen bestimmte 2021 das erste Mal an einer Lärm-Monitoringstation der Vorbeifahrtpegel der Personenzüge den Gesamtpegel.

SCHWARZENBEK

An der Messstation Schwarzenbek ist die Anzahl der verkehrenden Züge in den Jahren von 2019 bis 2021 etwa gleichgeblieben. Die Geschwindigkeit und die Länge der Güterzüge, insbesondere im Nachtzeitraum, hat jedoch signifikant zugenommen. Trotz dieser Zunahme zu den beiden Vorjahren konnte der Vorbeifahrtpegel im Vergleich zu 2019 um etwa 2 dB(A) reduziert werden. Dies wurde durch leiseres Rollmaterial verursacht. Der Anteil von als lärmarm gemessenen Güterwagen hat sich im Vergleich zu 2019 um über 14 Prozentpunkte erhöht. Die akustischen Gleiseigenschaften, insbesondere die Schienenrauheit auf dem Gleis 1 sind nicht repräsentativ. Aufgrund einer Gleissperrung bildete sich Flugrost auf Gleis 1, welcher zu einer erhöhten Schienenrauheit während der Messung führte.

NIENBURG

An der Lärm-Monitoringstation Nienburg konnte im Jahr 2021 der Mittelungspegel im Vergleich zu 2019 um 4,6 dB(A) gemindert werden. Dies kann durch den gestiegenen Anteil lärmarrer Güterwagen begründet werden. Dieser stieg um etwa 25 Prozentpunkte auf ein Jahresmittel von 89 Prozent lärmarrer Güterwagen und liegt über dem bundesweiten Durchschnitt. Das Verkehrsaufkommen in Anzahl und Geschwindigkeit sowie die akustischen Gleisparameter haben sich nicht wesentlich verändert.

CELLE

Der an der Lärm-Monitoringstation Celle gemessene Mittelungspegel für das Jahr 2021 liegt 4,1 dB(A) unterhalb des Werts des Jahres 2019. Insbesondere kann dies auf das akustisch bessere Rollmaterial der Güterzüge zurückgeführt werden. Im Jahr 2021 konnten im Mittel 90,5 Prozent der Güterwagen als lärmarm registriert werden. Dies sind 18 Prozentpunkte mehr als im Jahr 2019 und der dritthöchste Wert im Jahr 2021.

STADTHAGEN

An der Messstation Stadthagen nahm der Güterverkehr um über 24 Prozent zum Vorjahr zu. Trotz des gestiegenen Güterverkehrs konnte der Vorbeifahrtpegel im gleichen Zeitraum um 1,7 dB(A) und zum Jahr 2019 um 4,4 dB(A) reduziert werden. Dies kann unter anderem mit dem zweithöchsten Anstieg des Anteils an lärmarmen Güterwagen von etwa 28 Prozentpunkten zu 2019 begründet werden.

FÜRSTENWALDE

Wie bereits im Vorjahr nahmen im Jahr 2021 die Zugzahlen und der Anteil von Güterzügen leicht zu. Im Vergleich zu 2019 wurden im Jahr 2021 im Mittel 9 Güterzugvorbeifahrten pro 24 h mehr erfasst. Der niedrige Mittelungspegel von 70,6 dB(A) aus 2019 wurde nichtsdestotrotz um weitere 2 dB(A) zum Jahr 2021 reduziert. Dies liegt insbesondere am leiseren Rollmaterial der Güterzüge. Für das Jahr 2021 nahm der Anteil der als lärmarm gemessenen Güterwagen zu 2019 am Gesamtverkehr um über 27 Prozentpunkte zu. Die akustischen Gleiseigenschaften änderten sich nicht wesentlich.

EILSLEBEN

An der Messstation Eilsleben reduzierte sich der Mittelungspegel im Vergleich zu 2019 um 4,3 dB(A). Der Anteil lärmarmen Güterwagen liegt in Eilsleben bei 82,6 Prozent, dies entspricht einer Zunahme von 9,1 Prozentpunkten zum Vorjahr. Dies zeigt sich auch in dem deutlichen Rückgang des längengewichteten TEL80 von etwa 3,0 dB(A) auf beiden Gleisen.

TELGTE

Die Lärm-Monitoringstation Telgte verzeichnete im Jahr 2021 einen Rückgang der Schallemissionen (Mittelungspegel) um 3,3 dB(A) im Vergleich zu 2019. Wesentlich hierfür war die Umrüstung der Güterwagen. Der Anteil der als lärmarm gemessenen Güterwagen stieg auf 79 Prozent. Gleichzeitig stiegen Anzahl und Geschwindigkeit der Personenzüge, was deren Mittelungspegel erhöhte. Die Mittelungspegel von Güter- und Personenzügen unterscheiden sich nur noch um 1 dB(A).

EMMERICH

Trotz der Zunahme des Güterverkehrsanteils von 7,3 Prozentpunkten konnte der Mittelungspegel an der Messstation Emmerich im Vergleich zu 2019 um 2,1 dB(A) auf 67,1 dB(A) gesenkt werden. An dieser Messstation wurde im Jahr 2019 bereits ein vergleichsweise hoher Anteil lärmarmen Güterwagen gemessen. Der als lärmarm zu klassifizierende Anteil der Güterwagen nahm im Jahr 2021 um knapp 2 Prozent gegenüber 2020 ab. Da die Verteilungen aus Abbildung 13 keine Auffälligkeiten im Vergleich zum Vorjahr zeigen, die Gleisparameter und Zugzahlen vergleichbar sind und insgesamt die Pegelwerte auch für Güterzüge sinken ist anzunehmen, dass hauptsächlich wenige Güterwagen mit Schallwerten im Bereich des Grenzwertes für lärmarme Güterwagen die Statistik dominieren.

RADEBEUL

Der Verkehr an der Messstation Radebeul hat sich im Vergleich zum Jahr 2019 verdreifacht und die Geschwindigkeit sowie die Länge der Züge hat deutlich zugenommen. Trotzdem wurde der Mittelungspegel im gleichen Zeitraum um 2,2 dB(A) reduziert. Die Messungen zeigen für das Jahr 2021 etwa 80 Prozent der verkehrenden Güterwagen als lärmarm. Trotz der Zunahme um

28,5 Prozentpunkte ist dies zusammen mit Elmshorn und Stadthagen der niedrigste Wert und liegt deutlich unter dem bundesweiten Durchschnitt von 87 Prozent.

SAALFELD

Mit einem gemessenen Mittelungspegel von unter 63 dB(A) konnte an der Messstation Saalfeld der geringe Wert aus 2020 noch einmal um 2,6 dB(A) reduziert werden. Der im Vergleich zu anderen Messstationen niedrige Mittelungspegel ist auf die geringe Achszahl respektiv kurze Zuglänge und niedrige Zugzahlen zurückzuführen. Der Anteil lärmarmen Güterwagen stieg im Vergleich zu 2019 um etwa 20 Prozentpunkte auf 84,4 Prozent lärmarme Güterwagen.

BAD HERSFELD

Die Lärm-Monitoringstation Bad Hersfeld weist die höchste Zugfrequentierung aller Messstationen auf. Dabei stieg die Anzahl der täglich verkehrenden Güterzüge in 2021 auf 186. Trotz der Zunahme wurde im Jahr 2021 der Mittelungspegel mit 71,5 dB(A) um 2,5 dB(A) niedriger als 2019 gemessen. Wesentlich dazu beigetragen hat der höchste Anteil lärmarmen Güterwagen von über 92 Prozent. Im Jahr 2019 lag dieser Wert noch bei 64 Prozent.

ANDERNACH

An der Messstation Andernach wurde ein Mittelungspegel von 68,7 dB(A) gemessen. Vergleicht man die beiden Mittelungspegel aus 2019 und 2021 miteinander, kann mit 4,4 dB(A) die viertgrößte Reduktion des Schienenverkehrslärms ermittelt werden. Dies ist neben der geringeren Anzahl von Güterzugvorbeifahrten pro Tag auf das verbesserte Rollmaterial der Güterwagen zurückzuführen. Der Anteil lärmarmen Güterwagen stieg um 21,3 Prozentpunkte auf etwa 89,7 Prozent und weist somit den vierthöchsten Wert aller Stationen auf.

LAHNSTEIN

An der Messstation Lahnstein ist der Mittelungspegel für das Jahr 2021 im Vergleich zu 2019 um 4,5 dB(A) auf 67,4 dB(A) reduziert. Dies ist die dritthöchste Reduktion des Mittelungspegels an allen Stationen. Im gleichen Zeitraum wurden 91,7 Prozent (plus 17 Prozentpunkte zu 2019) der verkehrenden Güterwagen als lärmarm gemessen, ein Wert über dem bundesweiten Mittel. Ebenso führte ein besserer Gleiszustand zu niedrigeren Vorbeifahrtpegeln.

Trotz der Streckensperrung durch den Hangrutsch im April konnte keine Reduzierung der Gesamtzugvorbeifahrten über das Jahr 2021 zum Vorjahr festgestellt werden. Es verkehrten täglich im Mittel 149 Züge mit einem Anteil von etwa 69 Prozent an Güterzügen. Bereits im Jahr 2020 fand aufgrund einer Entgleisung im Bahnhof Lahnstein eine Streckensperrung statt.

KARLSTADT

An der Lärm-Monitoringstation Karlstadt wurden die meisten Güterzüge pro Tag registriert. Erwartungsgemäß lag der Mittelungspegel mit 72,0 dB(A) höher als der bundesweite Durchschnitt von 69,2 dB(A). Nichtsdestotrotz ist der Mittelungspegel im Vergleich zu 2019 um 3,4 dB(A) niedriger. Dies liegt an der Zunahme des Anteils lärmarmen Güterwagen um etwa 25 Prozentpunkte auf 88 Prozent. Eine Zunahme der durchschnittlichen Achszahl der Güterzüge verhinderte eine stärkere Pegelminderung. Die erhöhte Schienenrauheit zu den Vorjahren (siehe Abbildung 10) kann durch das Schienenschleifen unmittelbar vor der Messung begründet werden.

OSTERHOFEN

Der Mittelungspegel liegt an der Messstation Osterhofen bei 70 dB(A) und ist im Vergleich zu 2019 um den höchsten Wert von 4,7 dB(A) reduziert. Da sich die Randbedingungen, wie z. B. mittlere Zuganzahl oder mittlere Vorbeifahrtgeschwindigkeit zum Jahr 2019 nicht wesentlich geändert haben, kann die Minderung der Mittelungspegel der Umrüstung der Güterwagen zugeschrieben werden. Der Anteil gemessener lärmarmen Güterwagen liegt mit etwa 83 Prozent unter dem bundesweiten Mittel, konnte aber zum Jahr 2019 um 24 Prozentpunkte gesteigert werden. Weiterhin sind die Schienenoberflächen sehr glatt, was zu niedrigeren Pegeln führt, und die Abklingrate des Gleises sehr niedrig, was pegelerhöhend wirkt.

ROSENHEIM

An der Lärm-Monitoringstation Rosenheim lag der durch den Güterverkehr dominierte Mittelungspegel im Jahr 2021 bei 70 dB(A). Dies ist 2,5 dB(A) weniger als im Jahr 2019. Die Minderung des Mittelungspegels kann auf den höheren Umrüstgrad zurückgeführt werden. Der Anteil lärmarmen Güterwagen lag bei über 89 Prozent, im Vergleich zu 2019 konnte der Anteil lärmarmen Güterwagen um 24 Prozentpunkte gesteigert werden. Die Vorbeifahrtpegel der Personenzüge haben sich erhöht, was durch einen etwas schlechteren akustischen Gleiszustand verursacht sein kann. Die erhöhte Schienenrauheit zu den Vorjahren, vor allem auf Gleis 2, kann durch das Schienenschleifen unmittelbar vor der Messung begründet werden.

GÖPPINGEN

Mit einem Mittelungspegel von 68,4 dB(A) konnte an der Messstation Göppingen eine Minderung von 1,1 dB(A) zu 2019 ermittelt werden. Im Jahr 2021 wurden 82,6 Prozent (plus 18 Prozentpunkte) der verkehrenden Güterwagen als lärmarm gemessen. Zudem verkehrten die Güterzüge im Mittel genauso schnell wie im Vorjahr. Neben Elmshorn passieren die Station in Göppingen die meisten Personenzüge, so dass diese einen leichten Einfluss auf den Mittelungspegel haben. Die Vorbeifahrtexpositionspegel der Personenzüge erhöhten sich leicht. Dies könnte auch durch die etwas erhöhte Rauheit auf Gleis 1 verursacht sein.

EMMENDINGEN

Trotz einer Reduktion des Mittelungspegels um etwa 3,1 dB(A) zum Jahr 2019 liegt die Messstation Emmendingen leicht über den bundesweiten Durchschnitt. Der Anteil lärmarmen Güterwagen lag im Jahresmittel bei etwa 89 Prozent und somit über dem bundesweiten Durchschnitt. Der geringfügige Anstieg des Mittelungspegels um 0,3 dB(A) gegenüber dem Vorjahr kann auf die größere Anzahl von Güterzugvorbeifahrten an der Station und den etwas zurückgegangenen Anteil lärmarmen Güterwagen zurückgeführt werden. Gleichzeitig waren aufgrund der Nähe zur Schweiz, in der bereits im Jahr 2020 ein Verbot lauter Güterwagen galt, im Vorjahr die Güterwagen weitestgehend auf lärmarme Bremstechnik umgerüstet.

6.3 Akustische Eigenschaften der Gleise

6.3.1 Schienenrauheit

Die akustische Schienenrauheit ist eine wichtige Einflussgröße in Bezug auf das Rollgeräusch von Zugvorbeifahrten. In Kombination mit der Radrauheit werden die Schiene und das Rad zu Schwingungen angeregt, wodurch diese Komponenten Luftschall abstrahlen. Je höher die Summenrauheit aus Schienen- und Radrauheit, desto höher ist der abgestrahlte Luftschall bei gleichbleibenden Randbedingungen.

Es wurden die Schienenrauheiten in dB, re 1 μm entsprechend EN 15610:2019 [3] erfasst. Die Ergebnisse sind als Terzpegelspektren in Abhängigkeit der Wellenlänge in Anhang 5 dargestellt. Zur Verdichtung der Daten wurde jeweils der energetische Mittelwert über alle Messspuren beider Schienen separat für jedes Gleis und jeden Messquerschnitt bestimmt. Informativ enthält jedes Ergebnisdiagramm das Grenzspektrum für Referenzgleisabschnitte nach EN ISO 3095 [4].

Für eine bessere Übersicht und Vergleichbarkeit sind die Rauheits-Einzelwerte $L_{\lambda CA}$ in dB für die Bezugs-Geschwindigkeit 80 km/h angegeben. Die Bestimmung der Rauheits-Einzelwerte erfolgte entsprechend „*Deliverable 12 part 1 of the HARMONOISE project*“ [5]. Je kleiner der Rauheits-Einzelwert, desto kleiner ist die akustische Rauheit der Schienenoberfläche. Die Unterschiede der Rauheitseinzelwerte können als Anhaltswerte für die Änderung der Rollgeräuschemission bei verschiedenen Schienenrauheiten und gleichbleibenden sonstigen Bedingungen herangezogen werden. Nicht berücksichtigt ist dabei die Radrauheit. Bei glatten Schienen bzw. niedrigen Schienenrauheiten wird die Summenrauheit in der Regel von der Radrauheit bestimmt.

In HARMONOISE wird für den Rauheits-Einzelwert für eine Bezugsgeschwindigkeit von 120 km/h eine Einteilung in etwa wie folgt vorgenommen (für 80 km/h ist diese Klassifizierung i. d. R. vergleichbar; Grenzwerte können sich dabei aber geringfügig nach unten verschieben).

< 4 dB	glatte Schiene
5 – 7 dB	geschliffene und teils eingefahrene Schiene
7 – 9 dB	mittlere ermittelte Schienenrauheit 2001 – 2005 in den Niederlanden
10 – 11 dB	Rauheit vergleichbar mit der eines glatten Rades
14 – 17 dB	raue Schiene
18 – 20 dB	Rauheit vergleichbar mit der eines rauhen Rades (Grauguss gebremst)
> 25 dB	stark korrodierte Schiene

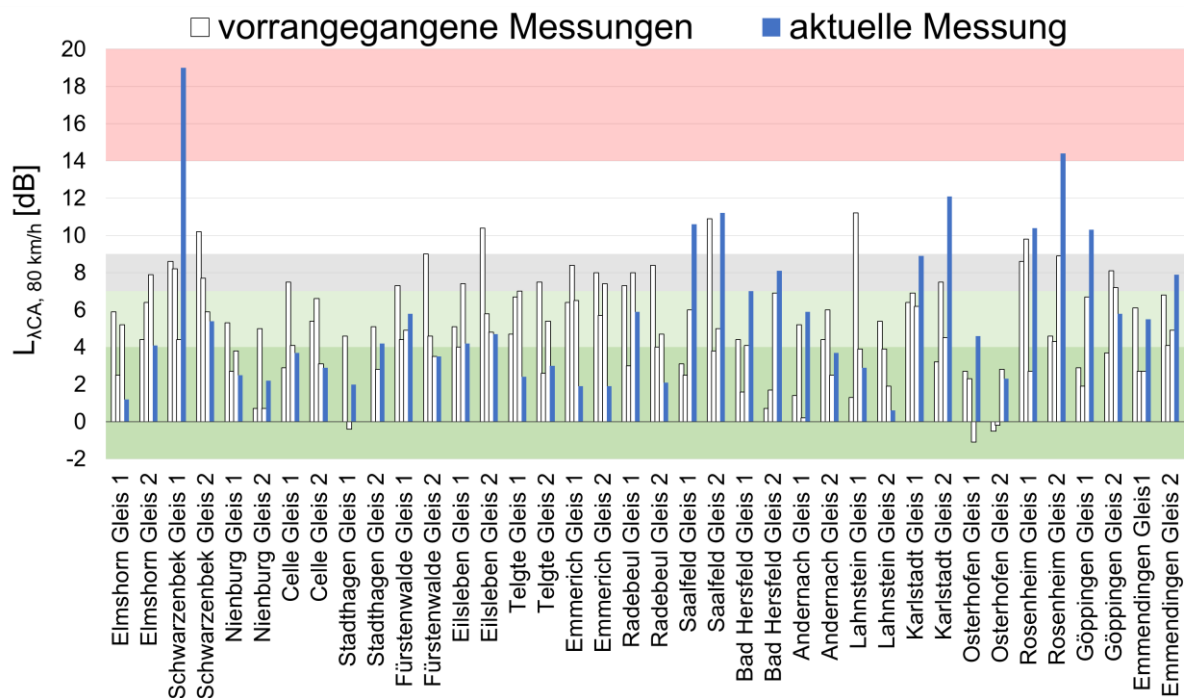


Abbildung 10: Rauheits-Einzelwerte $L_{\lambda CA}$ in dB für alle Messquerschnitte aller Messstandorte mit der Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h. Die grauen Balken repräsentieren die Ergebnisse der Initialmessung und die blauen Balken zeigen die Ergebnisse der aktuellen Messung (Messzeitraum Ende September 2021 bis Januar 2022).

Die Rauheits-Einzelwerte der jüngsten Messungen variieren signifikant zwischen 0,6 und 19 dB.

Die Schienenrauheit kann sich mit der Zeit verändern. Durch Radschäden, Bremsen, Verschmutzungen, Kurvenfahrten, Alterung, etc. entstehen Schäden in der Schienenlauffläche. Schienenschleifen entfernt diese Schäden i. d. R., hinterlässt aber je nach Schleifverfahren ein Schleifmuster, was ebenfalls rau ist. Dieses Schleifmuster fährt sich mit der Zeit ab. Der Effekt ist teils auch in Abbildung 10 ursächlich für die großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Messungen. An 12 von 19 Messorten liegt eine gute akustische Schienenrauheit mit $L_{\lambda CA} < 7$ vor. An zahlreichen Gleisen erfüllt die Schienenrauheit annähernd oder vollständig die Anforderungen an ein Referenzgleis nach EN ISO 3095. Jedoch zeigen die aktuellen Messungen, dass insgesamt 11 Gleise eine Schienenrauheit $L_{\lambda CA} \geq 7$ aufweisen, deutlich mehr als in den Vorjahren. Folgende Erklärungen konnten im Nachgang für die hohen Schienenrauheitswerte gefunden werden:

- Das Gleis 1 in Schwarzenbek wurde zum Zeitpunkt der Messung aufgrund von Gleissperrung nicht genutzt, so dass sich auf der Lauffläche der Schienen Rost gebildet hat. Es ist davon auszugehen, dass die Schienenrauheit bei Nutzung des Gleises wieder deutlich abgenommen hat.
- Die Messungen in Rosenheim erfolgten wenige Tage nach dem Schienenschleifen.
- An den Messstationen Karlstadt, Saalfeld und Bad Hersfeld wurden Längsriefen auf den Schienen festgestellt. Diese Riefen haben eine Breite deutlich kleiner als die Aufstandsfläche des Rades, so dass sie akustisch keine dominante Rolle spielen (so sind die TEL80 der Personenzüge hier z. B. nicht signifikant angestiegen, vgl. Abbildung 13), jedoch bei der Messung mit einem schmalen Tastkopf die Ergebnisse der Rauheitsmessung signifikant beeinflussen.

An Messstellen mit hohen Rauheits-Einzahlwerten erfahren Rad und Schiene i. d. R. stärkere Anregungen. Der Vorbeifahrtpegel kann dadurch erhöht sein. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge mit glatten Radlaufflächen, wohingegen für Fahrzeuge mit rauen Radlaufflächen der Einfluss der Schiene geringer ist.

Rauheits-Einzahlwerte für die Bezugs-Geschwindigkeit 120 km/h und detaillierte Darstellungen der Schienenrauheit für alle Messstandorte finden sich in Anhang 5.

6.3.2 Abklingrate

Die Gleisabklingrate ist eine weitere wichtige Einflussgröße in Bezug auf das Rollgeräusch von Zugvorbeifahrten. Die Gleisabklingrate in dB/m stellt die längenbezogene Dämpfung des Gleises dar. Je höher die Abklingrate, desto geringer ist die Schwingungsausbreitung in der Schiene. Damit ist bei höheren Abklingraten auch der von der Schiene abgestrahlte Luftschall geringer.

Anders als die Schienenrauheit hat die Gleisabklingrate auch bei Rädern mit rauen Radlaufflächen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Schallemission.

Es wurden die Gleisabklingraten in dB/m entsprechend EN 15461:2008 [6] bestimmt. Die Abklingraten sind als Terzbandspektren für die vertikale und horizontale Messrichtung für jede Schiene dargestellt. Dabei bezieht sich die Bezeichnung „linke“ bzw. „rechte“ Schiene auf die Fahrtrichtung. Informativ enthält jedes Ergebnisdiagramm das Grenzspektrum für Referenzgleisabschnitte nach EN ISO 3095 [4]. (Hinweis: Einzelne Frequenzbereiche der Graphen sind grau dargestellt, sofern das Ergebnis als nicht vertrauenswürdig einzustufen ist, z. B. aufgrund unzureichender Signalqualität.)

Die Abklingrate ist an den Messstandorten sehr unterschiedlich. Referenzgleiseigenschaften werden an vielen Standorten zumindest annähernd erreicht. Auffällig sind Standorte mit sehr geringen Abklingraten wie Schwarzenbek (Gleis 1), Stadthagen (Gleis 1), Saalfeld (Gleis 2), Radebeul, Göppingen (Gleis 2), Osterhofen, Emmendingen und Telgte, an denen von einer verstärkten Schallabstrahlung durch das Gleis auszugehen ist.

Im Vergleich zu den Vorjahren haben sich die Abklingraten in der Regel nicht signifikant verändert.

Detaillierte Darstellungen der Abklingraten für alle Messstandorte finden sich in Anhang 5.

6.4 Akustische Eigenschaften des Rollmaterials

6.4.1 Vorbeifahrtexpositionspegel der Züge

Der *TEL80* gibt den auf 80 km/h normierten Vorbeifahrtexpositionspegel einer Zugvorbeifahrt an. Dieser ist größtenteils unabhängig von der Länge und der Geschwindigkeit eines Zuges. Bei gleichen akustischen Ausbreitungsbedingungen gehen Unterschiede in den Werten auf unterschiedliche Eigenschaften des Rollmaterials (v. a. Rauheit der Räder) und des Gleises (Rauheit und Abklingrate) zurück.

In Abbildung 11 wird die Häufigkeitsverteilung aller im Jahre 2021 gemessenen Vorbeifahrtexpositionspegel für die Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h, getrennt nach Güter- und Personenzügen im Vergleich zu den Vorjahren 2019 bis 2020 dargestellt.



Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung des Vorbeifahrtexpositionspegel für 80 km/h (*TEL80*). In der oberen Häufigkeitsverteilung werden die Güterzüge aus dem Jahr 2019 bis 2020 (hellgelb) mit dem Jahre 2021 (gelb) verglichen. In der unteren Häufigkeitsverteilung werden die Personenzüge aus dem Jahr 2019 bis 2020 (hellgrün) und 2021 (grün) gegenüber gestellt.

Insgesamt lässt sich erkennen, dass das Rollmaterial der Personenzüge i. d. R. akustisch besser ist als das der Güterzüge. Das Maximum der Verteilung der Personenzüge ist etwa 3 bis 5 dB(A) niedriger als das Maximum der Verteilung der Güterzüge.

Der Vergleich der Jahre 2019, 2020 und 2021 zeigt für die Güterzugvorbeifahrten, dass sich das Maximum der Verteilung um über 5 dB(A) in Richtung leiserer Vorbeifahrtsexpositionspegel verschoben hat. Die zwei Gipfel der Verteilung aus dem Jahr 2019, welche lauten und leiseren Zügen zugeordnet werden konnten, lassen sich in der Verteilung für das Jahr 2021 nicht mehr erkennen. Stattdessen ist der lautere Gipfel verschwunden. Weiterhin zeigt der Vergleich der Jahre 2020 und 2021 für Güterzugvorbeifahrten, dass sich das Maximum der Verteilung nicht verschoben hat. Jedoch zeigt die Verteilung aus 2021, dass sich der Anteil der lauten Güterzüge stetig minimiert. Dies ist auf die Umrüstung der Güterwagen auf Verbundstoff-Bremssohlen sowie die Modernisierung des Rollmaterials zurückzuführen.

Der Vergleich der Vorbeifahrtsexpositionspegel der Personenzüge von 2019 bis 2021 lässt erkennen, dass sich die akustischen Eigenschaften in der Fläche zwischen 2019 und 2020 nicht wesentlich geändert und zum Jahr 2021 leicht verändert haben. Die Häufigkeitsverteilung von 2021 der Personenzüge zeigt eine leichte Verschiebung um etwa 1 dB(A) hin zu einem lauteren Vorbeifahrtsexpositionspegel.

In Abbildung 12 ist der mittlere längengewichtete TEL_{80} der Güterzüge für jede Station, getrennt für die Jahre 2019 bis 2021 sowie für jeweils beide Gleise dargestellt.

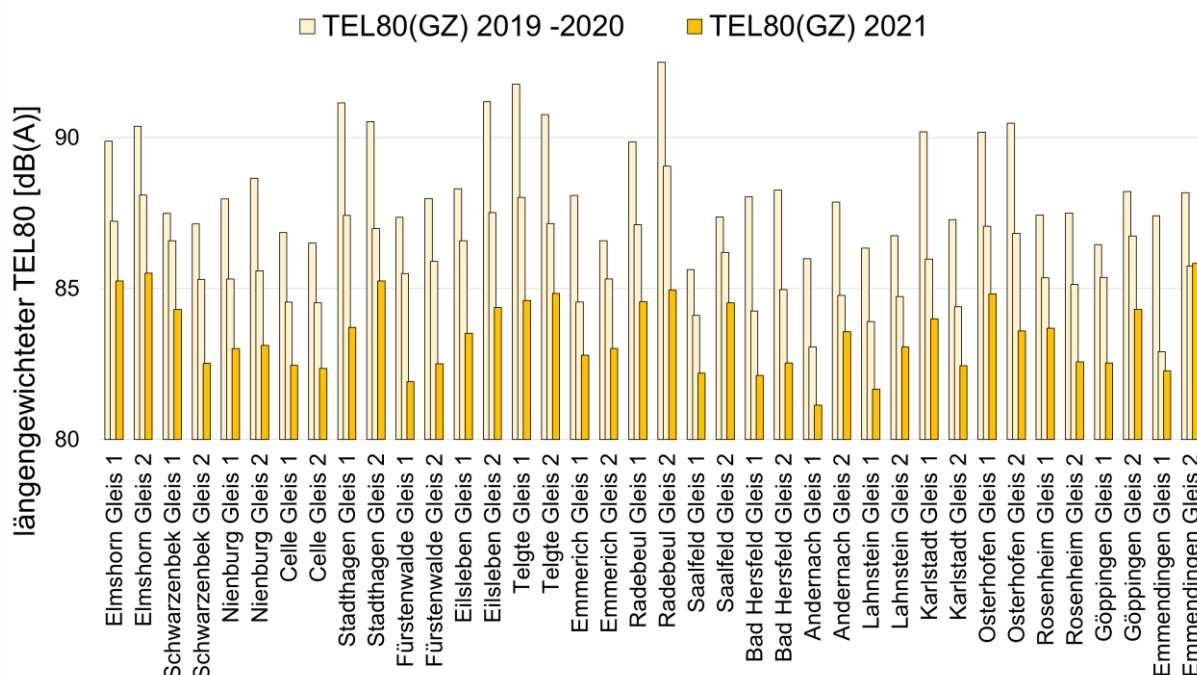


Abbildung 12: mittlerer längengewichteter Vorbeifahrtsexpositionspegel TEL_{80} an allen Stationen für Güterzüge in den Jahren 2019 bis 2020 (hellgelb) und 2021 (gelb).

Der längengewichtete TEL_{80} der Güterzüge reicht von 81,2 dB(A) in Andernach auf Gleis 1 bis zu 85,5 dB(A) in Emmendingen auf Gleis 2. Die Werte haben sich im Mittel um etwa 5 dB(A) zum Jahr 2019 verringert. Die Reduzierung des längengewichteten TEL_{80} für Güterzüge lässt sich auf das Rollmaterial und somit auf die Umrüstung von Grauguss- auf Verbundstoff-Bremssohle zurückführen. Lediglich an Gleis 2 der Station Emmendingen konnte eine Erhöhung des

längengewichteten TEL_{80} um 0,1 dB(A) verzeichnet werden. Gerade an der Messstation Emmendingen ist davon auszugehen, dass aufgrund der räumlichen Nähe zur Schweiz, in der bereits im Jahr 2020 der Betrieb lauter Güterwagen verboten war, schon im Jahr 2020 nur noch sehr wenige laute Güterwagen verkehrten, so dass hier für das Jahr 2021 keine weitere Reduktion zu erwarten war.

In der folgenden Abbildung 13 ist der mittlere längengewichtete TEL_{80} der Personenzüge für jede Station, getrennt für die Jahre 2019 bis 2021 und für jeweils beide Gleise dargestellt.

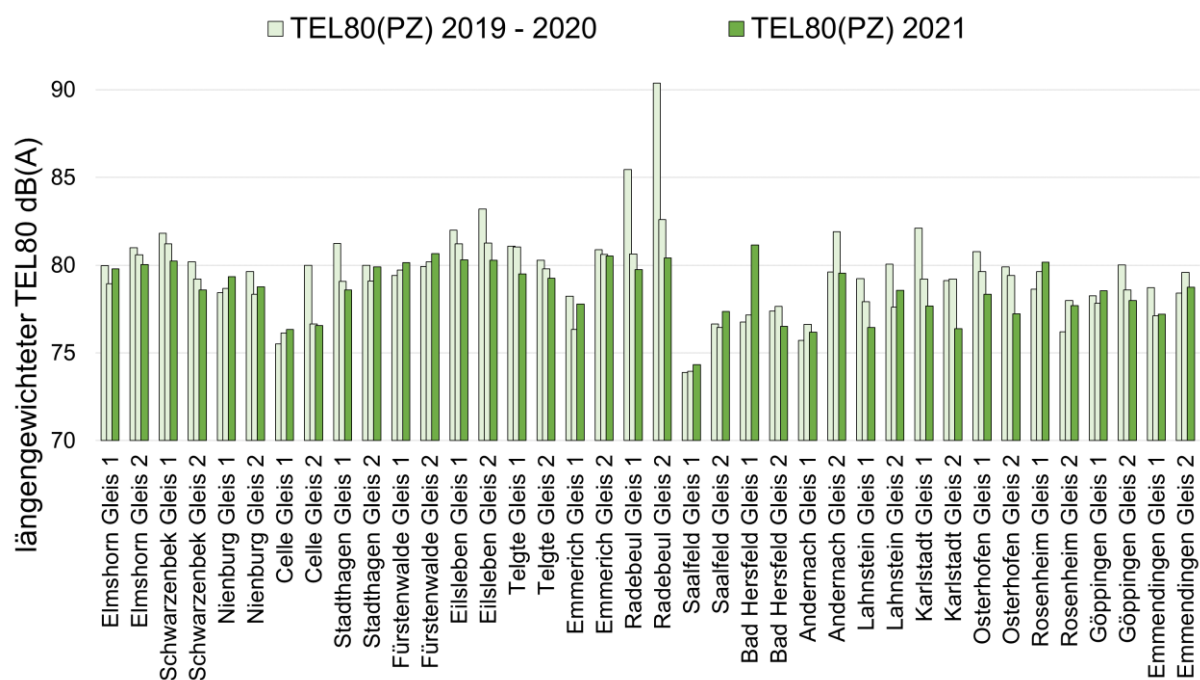


Abbildung 13: mittlerer längengewichteter Vorbeifahrtexpositionspegel TEL_{80} an allen Stationen für Personenzüge in den Jahren 2019 bis 2020 (hellgrün) und 2021 (grün).

Die Werte der längengewichteten TEL_{80} für Personenzüge reichen zwischen 74,3 dB(A) in Fürstenwalde auf Gleis 1 bis 81,2 dB(A) in Bad Hersfeld auf Gleis 1. Der in Bad Hersfeld auf Gleis 1 um etwa 4,5 dB(A) gestiegene längengewichtete TEL_{80} lässt sich hauptsächlich auf häufigeres betätigen des Makrophons zurückführen. In Radebeul auf Gleis 2 konnte der mittlere längengewichtete TEL_{80} um 10 dB(A) reduziert werden. Der Wert des Jahres 2019 ist aufgrund der Baustellensituation und den damit verbundenen sehr niedrigen Geschwindigkeiten sowie der insgesamt kleinen Anzahl von Personenzugvorbeifahrten als Ausreißer zu betrachten. Wenn man davon ausgeht, dass das an einer Messstation verkehrende Rollmaterial der Personenzüge über die Zeit gleichbleibt, können die unterschiedlichen Entwicklungen der Werte mit dem Gleiseinfluss in Verbindung gebracht werden. So lässt sich z. B. der hohe gemessene Wert in Saalfeld mit einer rauheren Schienenfahrfläche erklären.

Den Einfluss des Schienenschleifens auf den TEL_{80} der Personenzüge ist in Abbildung 14 ersichtlich. Hier ist der Verlauf des durchschnittlichen TEL_{80} pro Tag der Messstation Karlstadt für den Zeitraum vom 01.01.2021 bis 31.01.2021 dargestellt.

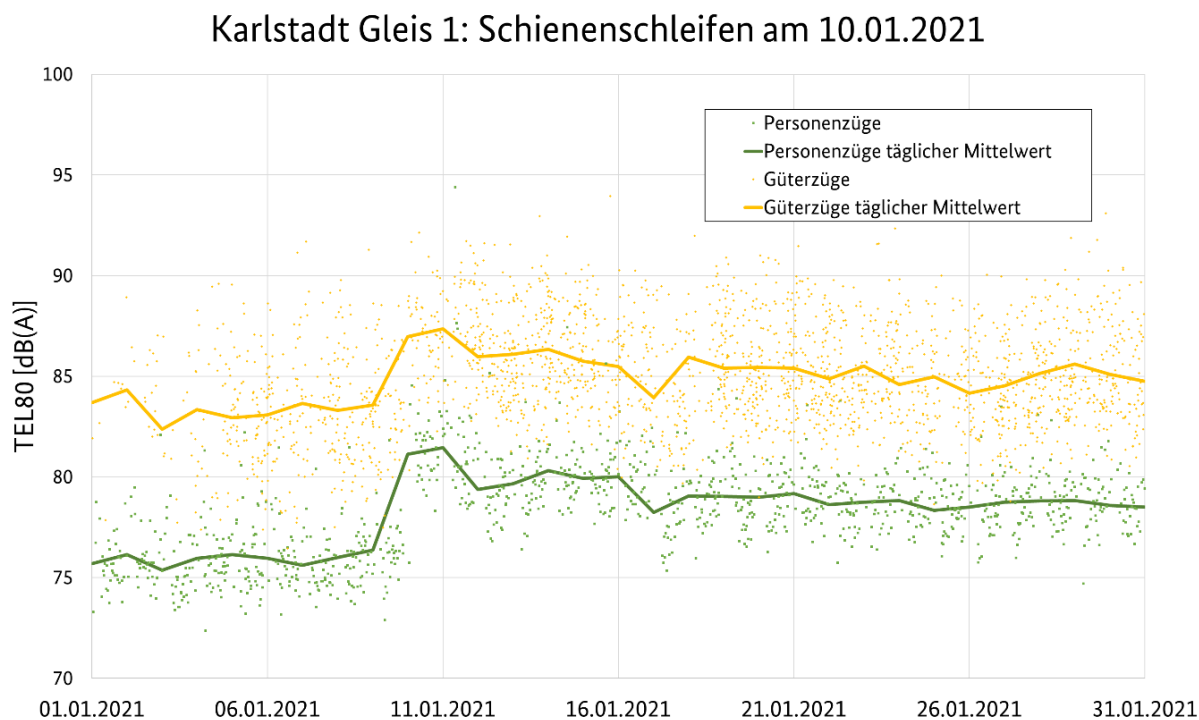


Abbildung 14: Temporäre Auswirkung des Schienenschleifens am 10.1.2021 auf den Vorbeifahrtpegel am Beispiel „Messstation Karlstadt“ auf Gleis 1.

Man erkennt deutlich, wie die Werte nach dem Schleifen am 10.01.2021 ansteigen und sich in der Folge langsam wieder reduzieren.

6.4.2 Vergleich zwischen Maximal- und Vorbeifahrtexpositionspegel

Zusätzlich zum Vorbeifahrtexpositionspegel kann auch der Maximalpegel einer Zugvorbeifahrt angegeben werden. Bestimmt wird dieser i. d. R. durch die Achsen mit der akustisch schlechtesten Radqualität. Für Zugvorbeifahrten mit starken Differenzen zwischen Maximal- und Vorbeifahrtexpositionspegel sind oft einzelne Wagen mit akustisch schlechten Rädern für die hohen Maximalpegel verantwortlich.

Um zu dokumentieren, inwieweit sich der bei einer Zugvorbeifahrt auftretende maximale Schalldruckpegel $L_{A_{fmax}}$ von dem mittleren Vorbeifahrtexpositionspegel TEL unterscheidet, wurde für alle gültigen, registrierten Zugvorbeifahrten die Differenz aus den beiden Schallpegeln gebildet. Für die Jahre 2019 bis 2021 (Abbildung 15) sind die Differenzen in einem Histogramm getrennt für Güter- und Personenzüge dargestellt.

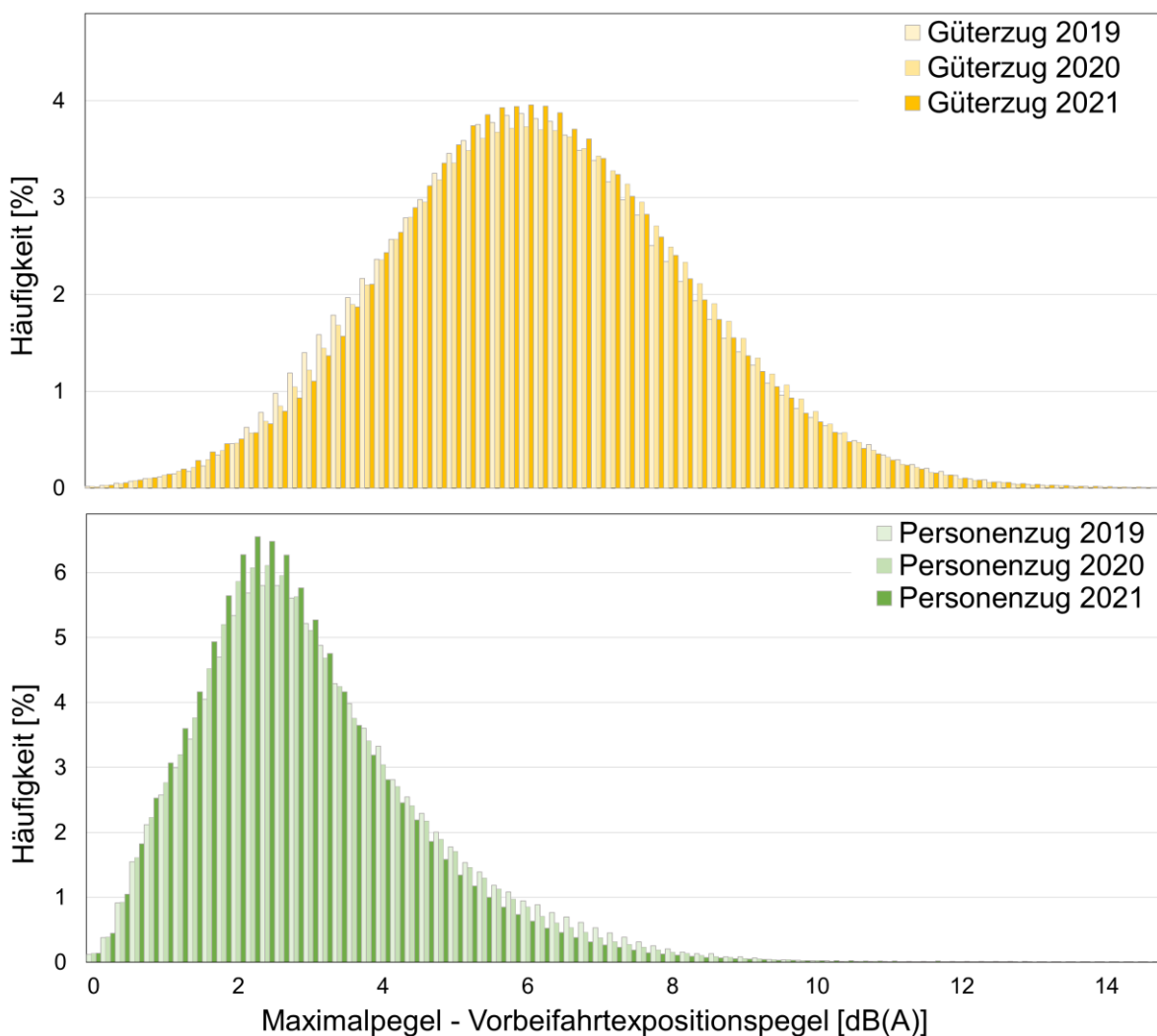


Abbildung 15: Die Häufigkeitsverteilungen stellen die Differenz zwischen Maximal- und Vorbeifahrtexpositionspegel dar. Im oberen Teil der Abbildung sind die Häufigkeitsverteilungen für Güterzüge aus dem Jahr 2019 bis 2020 (hellgelb) mit dem Jahre 2021 (gelb) dargestellt. Im unteren Teil sind die Häufigkeitsverteilungen der Personenzüge aus dem Jahr 2019 bis 2020 (hellgrün) und 2021 (grün) gegenüber gestellt.

Abbildung 15 zeigt, wie häufig es im Jahr 2021 (gelb und grün) vorkam, dass der Maximalpegel den mittleren Vorbeifahrtexpositionspegel um einen bestimmten Schallbetrag in dB(A) überschritten hatte und vergleicht dies mit den Ergebnissen aus dem Vorjahr. Erkennbar liegt der Schwerpunkt der Verteilung für Güterzüge um 3-4 dB(A) höher als der für Personenzüge. Zurückzuführen ist dies zum einen auf die stark unterschiedliche Radlaufflächenqualität in Güterzügen als auch auf die größere Länge (Achszahl), welche eine höhere Varianz erwarten lässt. Insgesamt ist für eine Zugvorbeifahrt eines Personenzuges eine geringere Schallpegelvariation zu erwarten als für Güterzüge.

Im Vergleich zu den Daten aus dem Jahresbericht 2019 und 2020 hat sich keine große Veränderung in der Differenz zwischen Maximal- und Vorbeifahrtexpositionspegel ergeben. Für die Güterzüge ist dies ein interessantes Ergebnis, da durch die Umrüstung insgesamt weniger laute Güterwagen in den Zügen verkehrten. Die Messungen ergeben, dass mit den sinkenden Vorbeifahrtexpositionspegeln auch die Maximalpegel der Züge gesunken sind.

Bei den Personenzügen kann man eine leichte Abnahme der höheren Werte und eine leichte Zunahme bei der Häufigkeit der kleineren Werte erkennen. Dies deutet auf eine leichte Zunahme von Zügen hin, welche eine homogene Pegelverteilung haben (z. B. Triebzüge) und eine Abnahme von Zügen mit einer inhomogenen Pegelverteilung (z. B. lokbespannte Personenzüge).

6.4.3 Schallemission einzelner Wagen

Abbildung 16 zeigt für Personenwagen die Häufigkeitsverteilung der Schallpegel $L_{pAeq,Tp,80}$ umgerechnet auf 80 km/h und für Güterwagen die Häufigkeitsverteilung der auf ihre Achsen pro Länge bezogenen Schallpegel $L_{pAeq,Tp,APL,80}$ für 80 km/h. Diese Kenngrößen werden auch für die Zulassung von neuen Fahrzeugen in der TSI Lärm verwendet³. In die dargestellten Vorbeifahrtpegel einzelner Fahrzeuge gehen neben der Qualität des Rollmaterials auch die akustischen Gleiseigenschaften ein.

Die Vorbeifahrtpegel für die Personenwagen sind in der Regel niedriger als die der Güterwagen. Dies ist auf das bessere Rollmaterial der Personenwagen zurückzuführen.

³ Weitere Anforderungen an Abnahmemessungen aus der TSI Lärm zur Wagenreihung sowie zum akustischen Gleiszustand können im Rahmen von Messungen im realen Betrieb jedoch i. d. R. nicht eingehalten werden.

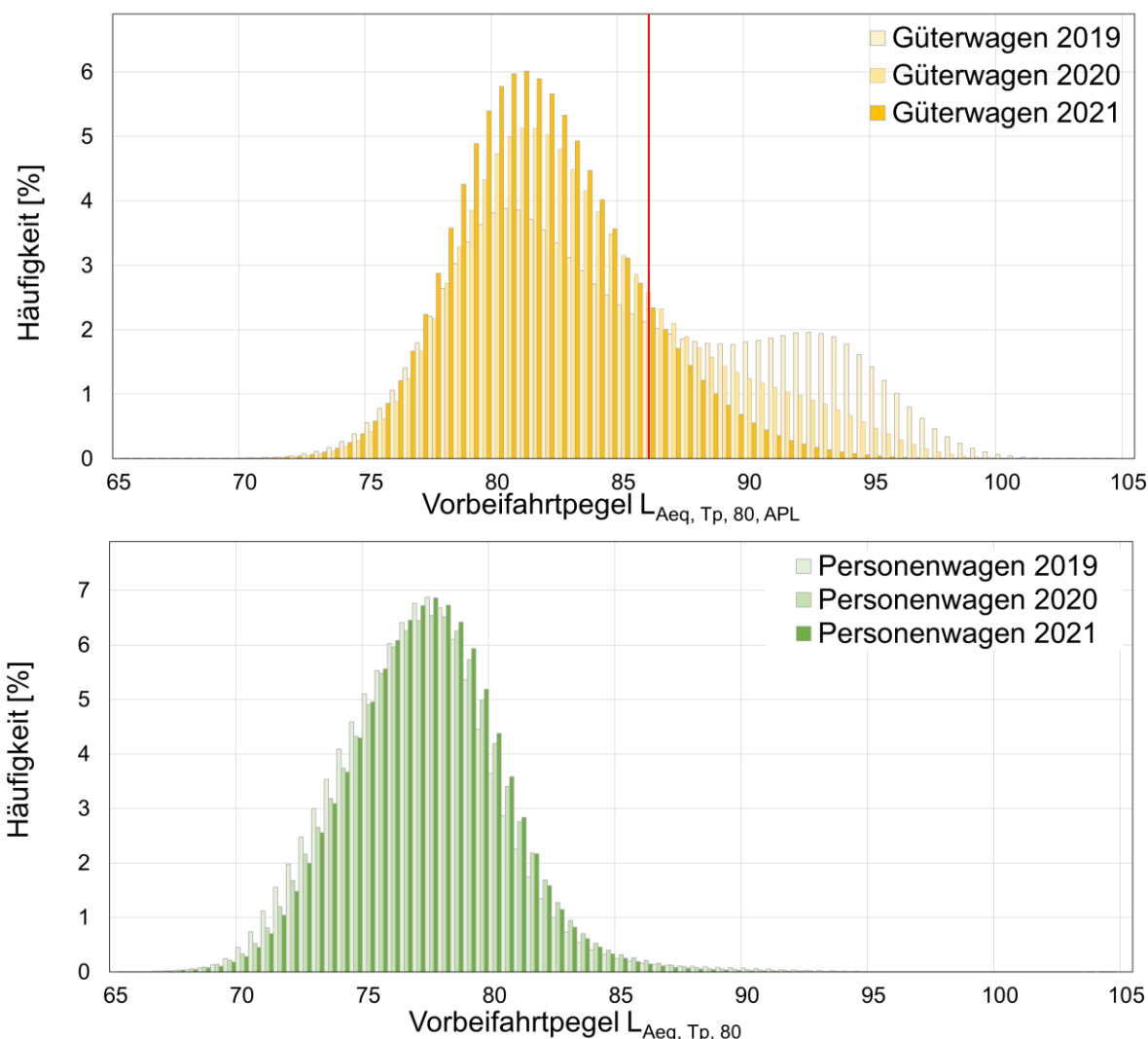


Abbildung 16: Schallpegelverteilung aller Güterwagen korrigiert auf ihren auf Achsen pro Länge bezogenen Schallpegel $L_{pAeq, Tp, APL, 80}$ für 80 km/h für die Jahre 2021 (gelb) und 2021 bis 2020 (hellgelb) und der aller Personenwagen für den Schallpegel $L_{pAeq, Tp, 80}$ umgerechnet auf 80 km/h für die Jahre 2021 (grün) und 2019 bis 2020 (hellgrün). Die rote Linie bei 86 dB(A) dient der Trennung lauter von lärmarmen Güterwagen. Im Jahr 2021 wurden rund 87 Prozent aller Güterwagen als lärmarm gemessen.

Im Vergleich der Jahre 2019 bis 2021 lässt sich für die Personenwagen erkennen, dass die Häufigkeitsverteilung von 2021 der Personenzüge eine leichte Verschiebung um etwa 1 dB(A) hin zu lauterem Werten erfahren hat.

Im Vergleich der Vorbeifahrtpegel für die Güterwagen lassen sich die zwei Gipfel der Verteilung aus dem Jahr 2019, welche lauten und leiseren Güterwagen zugeordnet werden konnten, in der Verteilung für das Jahr 2021 nicht mehr erkennen. Stattdessen hat die Verteilung ein Maximum bei etwa 80 dB(A), welches den umgerüsteten Güterwagen zugeordnet werden kann. Der Vergleich zwischen 2020 und 2021 zeigt keine Verschiebung des Maximums bei etwa 80 dB(A). Der Verlauf zeigt, dass die Flanke hin zu den lauten Werten deutlich flacher geworden ist, insbesondere bei den Vorbeifahrtpegeln über 90 dB(A). Dies weist allgemein auf eine verbesserte Qualität des Rollmaterials von Güterwagen hin.

Für Neuzulassungen von Güterwagen nach TSI Lärm (2014) [1] liegt der bei Abnahmemessungen einzuhaltende Grenzwert bei 83 dB(A) – und wird bei den Abnahmemessungen durch die

Verwendung von Verbundstoff-Bremssohlen bzw. Scheibenbremsen eingehalten. Bei Messungen im realen Betrieb können Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen diesen Wert jedoch übersteigen, ohne dabei den Vorgaben der TSI Lärm zu widersprechen, z. B. wenn der akustische Gleiszustand nicht den hohen Vorgaben der Abnahmemessung entspricht. Damit Grauguss-Bremssohlen ausgestattete Güterwagen grundsätzlich einen Vorbeifahrtpegel von mehr als 86 dB(A) aufweisen, werden Güterwagen mit einem Vorbeifahrtpegel von 86 dB(A) oder kleiner als lärmarm bezeichnet. Die in Abbildung 16 eingezeichnete vertikale Trennlinie bei 86 dB(A) grenzt lärmarme Güterwagen von laueren Güterwagen ab.

In der Summe können 87 Prozent der im Jahr 2021 gemessenen Güterwagen als lärmarm, d. h. als sicher umgerüstet, klassifiziert werden. Im zeitlichen Verlauf seit Mai 2019 lässt sich dabei eine Entwicklung hin zu geringeren Schallpegeln ausmachen (siehe Kapitel 6.4.3 und Abbildung 23). Nicht lärmarme Güterwagen sind jedoch nicht zwingend mit Grauguss-Bremssohlen ausgestattet. Auch umgerüstete Güterwagen, die in einem akustisch ungünstigen Zustand sind, können diesen Wert überschreiten. Besonders ungünstige akustische Gleiseigenschaften an einzelnen Messstationen verstärken den Effekt. Die Ergebnisse der Kontrollen des Eisenbahn-Bundesamts zeigen, dass im Jahr 2021 nur mit 0,3 Prozent der überprüften Güterwagen gegen das Betriebsverbot für laute Güterwagen verstoßen wurde.

Der Einfluss der Bremsausstattung auf die Schallemission der Güterwagen ist in Abbildung 17 dargestellt. Dazu wurde Güterwagen, für welche eine Wagenummer erkannt wurde und die im nationalen Fahrzeugregister gelistet sind, die dort hinterlegte Bremsausstattung zugeordnet und eine Häufigkeitsverteilung der Vorbeifahrtpegel dieser Wagen für jede Bremskategorie erstellt.

rel. Häufigkeit Vorbeifahrtpegel aus 2021 aufgeteilt nach Bremsausstattung

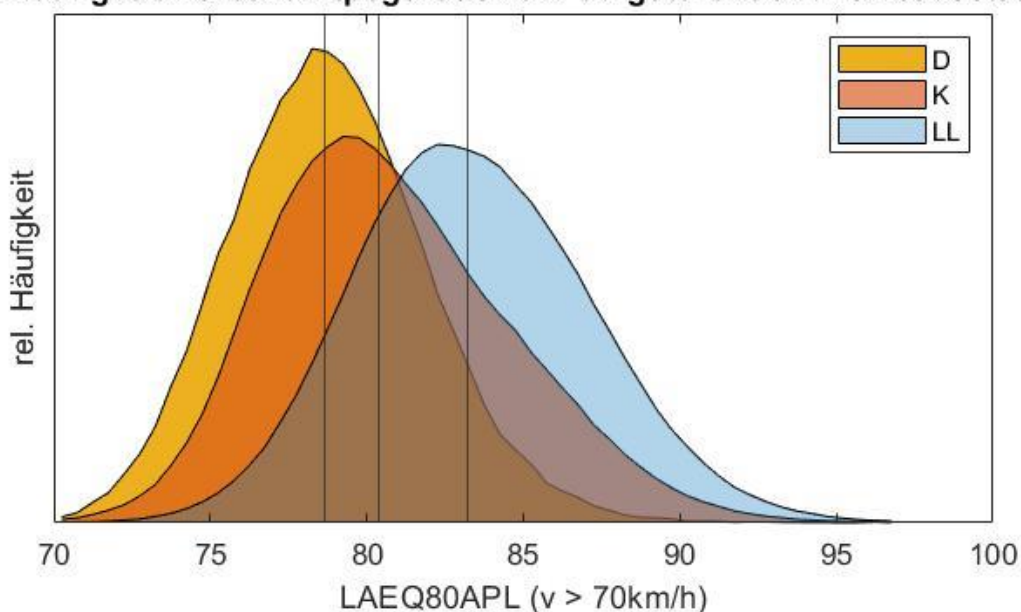


Abbildung 17: Schallpegelverteilung aller Güterwagen mit einer nach der UIC-Nummer und dem NVR zuordenbare Bremsausstattung der im Jahr 2021 gemessenen Zugvorbeifahrten. Die schwarzen Linien stellen jeweils die Medianwerte dar.

Abbildung 17 zeigt, dass die Häufigkeitsverteilung der mit LL-Sohlen ausgestatteten Güterwagen ihren Median bei einem Vorbeifahrtpegel von 83,2 dB(A) haben und somit einen um 2,8 dB(A)

lauteren Medianwert wie Güterwagen mit K-Sohlen aufweisen (80,4 dB(A)). Güterwagen mit Scheibenbremsen weisen mit einem Medianwert von 78,8 dB(A) die niedrigsten Vorbeifahrtpegel auf. Die Verteilung zeigt, dass selbst umgerüstete Güterwagen nicht immer als lärmarm klassifiziert werden. Bei etwa 20 Prozent der Güterwagen mit LL-Sohlen und 10 Prozent der Güterwagen mit K-Sohlen wurde ein Vorbeifahrtpegel über 86 dB(A) gemessen. Dies lässt auf einen ungünstigen akustischen Zustand der Güterwagen schließen.

Güterwagen, die auf LL-Sohlen umgerüstet wurden, sind in der Regel deutlich älter als Güterwagen mit K-Sohlen, welche oftmals ab Werk mit K-Sohle ausgestattet sind. Werden in Zukunft die Güterwagen mit LL-Sohlen nach und nach mit neuen Güterwagen mit K-Sohlen ersetzt, so sollte dies zu weiteren Pegelminderungen führen.

Für den Vergleich der Schallemissionen der einzelnen Fahrzeuge an den einzelnen Stationen wurden Häufigkeitsverteilungen für beide Gleise errechnet (links) und zusammen mit den energetischen Mittelwerten (rechts) für Güter- bzw. Personenwagen in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Für Güterwagen wurde der auf Achsen pro Länge korrigierte Schallpegel $L_{pAeq,TP,APL,80}$ bei 80 km/h verwendet. Für Güterwagen sind die Verteilungen recht breit und lassen an einigen Orten Doppelverteilungen erkennen. An einigen Messorten liegt das Maximum der Verteilung hin zu geringeren Schalldruckpegeln, was für umgerüsteten Zustand der Güterwagen spricht. In der Fläche kann im Vergleich zu 2019 und 2020 ein Rückgang der Schallemissionen für 2021 verzeichnet werden. Bis auf Gleis 2 in Stadthagen, liegen die Schallemissionen an allen Gleisen unter 85 dB(A).

Weiterhin kann auch der Effekt der akustischen Gleisqualität auf die Vorbeifahrtpegel veranschaulicht werden. In Saalfeld sind die Rauheiten beider Gleise etwa gleich, die Abklingraten der Gleise unterscheiden sich jedoch deutlich. Da dies jede Wagnvorbeifahrt etwa gleich beeinflusst, sind die gesamten Verteilungen der Gleise zueinander verschoben. In Lahnstein hingegen sind die Werte der Abklingraten der beiden Gleise vergleichbar, während sich die Rauheiten deutlich unterscheiden. Dies beeinflusst die lauteren Vorbeifahrten nicht, da für diese die großen Rauheiten der Räder maßgeblich für die Anregung sind. Die Maxima der leiseren Vorbeifahrten fallen hingegen auseinander.

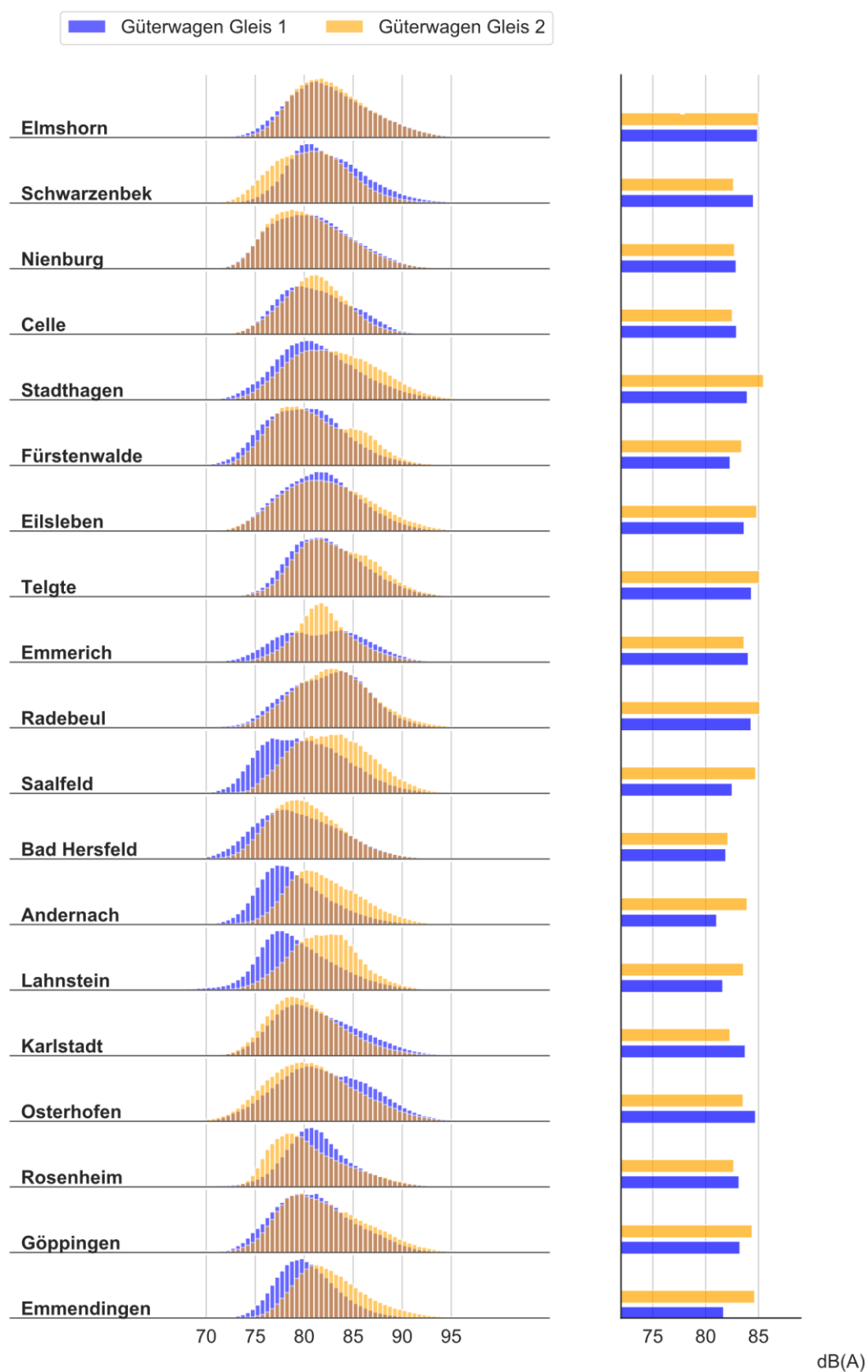


Abbildung 18: Äquivalenter Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T,APL,80}$ korrigiert auf Achsen pro Länge für Güterwagen mit 80 km/h an allen Stationen und für beide Gleise getrennt dargestellt. Links als Häufigkeitsverteilung und rechts als energetischer Mittelwert.

Für Personenzugwagen (Abbildung 19) kann ein akustisch guter Zustand der Radlaufflächen angenommen werden. Die Unterschiede in den Schallemissionen werden also durch den Zustand der Gleise stark beeinflusst. Die Verteilungen für Schallemissionen von Personenzugwagen sind an der Messstation Emmerich dadurch deutlich zueinander verschoben. Mit der Ausnahme von 5 Gleisen liegt der energetische Mittelwert der Personenzugvorbeifahrtpegel unter 80 dB(A).

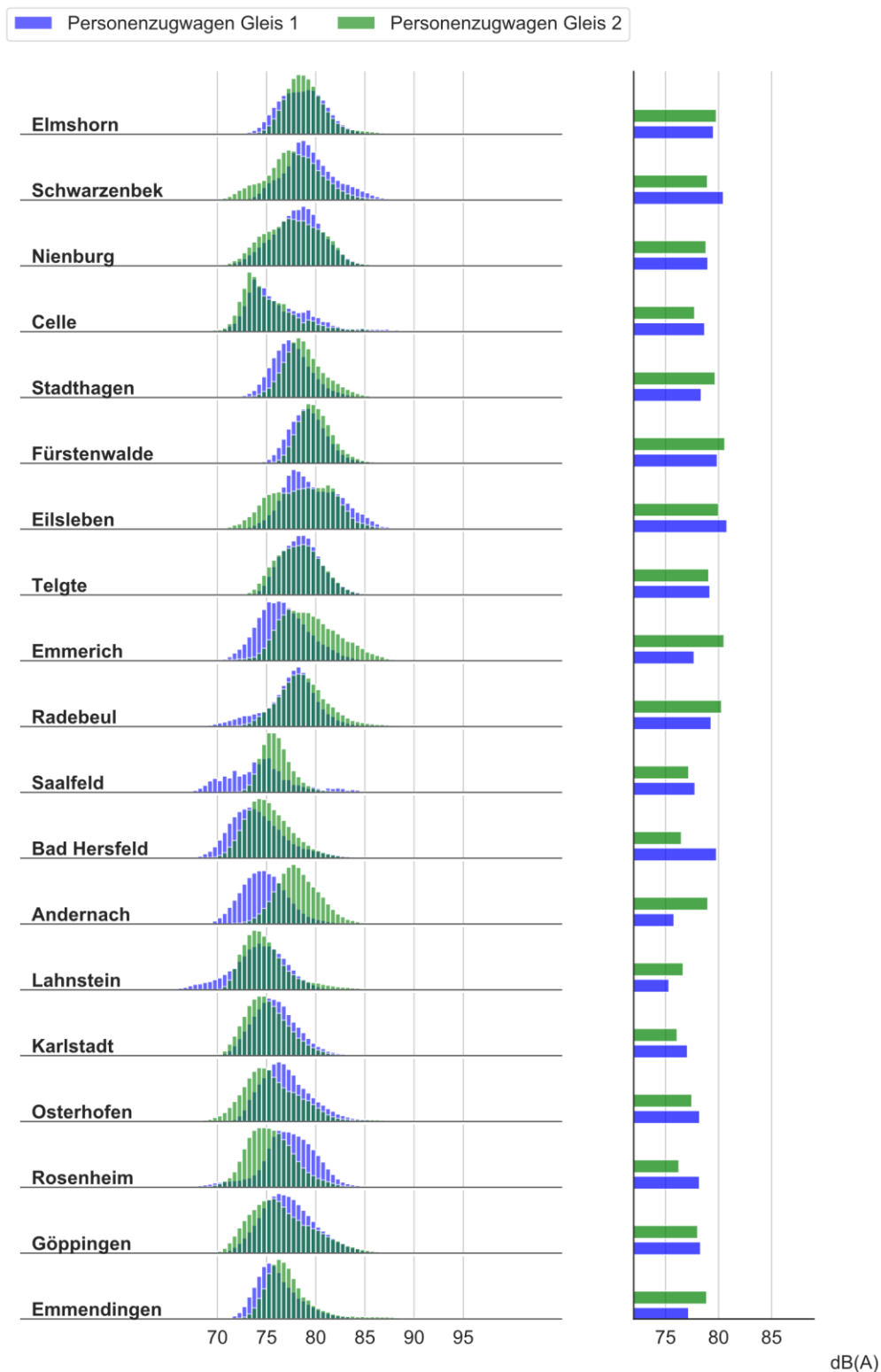


Abbildung 19: Äquivalenter Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T,80}$ bezogen auf 80 km/h an allen Stationen und für beide Gleise getrennt dargestellt. Links als Häufigkeitsverteilung und rechts als energetischer Mittelwert.

Der Trennwert von 86 dB(A) des auf die Achsen pro Länge bezogenen Schallpegels $L_{pAeq,Tp,APL,80}$ bei 80 km/h wird auch verwendet um an den einzelnen Messstandorten den Anteil lärmarmen Güterwagen zu bestimmen. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 20 im Vergleich zu den Jahren 2019 bis 2020 dargestellt. Güterwagen ungültiger Zugfahrten (z. B. wenn es zu Zugbegegnungen kam) flossen nicht mit ein. Auch wurden keine Güterwagen mit einer Geschwindigkeit kleiner 60 km/h berücksichtigt, weil unklar ist welchen Fehler die Umrechnung auf 80 km/h in den Formeln (4) und (5) für langsame Züge mit sich bringt. Die Anzahl der Güterwagen an den verschiedenen Messstationen hängt von dem Verkehrsaufkommen ab. Die Berechnung für lärmarme Güterwagen ergab ein bundesweites Mittel für das Jahr 2021 von 87 Prozent.

Wie Abbildung 20 zu entnehmen, ist der Anteil lärmarmen Güterwagen an fast allen Messstationen gewachsen. Lediglich an den Stationen Telgte, Emmerich und Emmendingen kann ein leichter Rückgang verzeichnet werden. Durch die Grenznähe zu der Schweiz war der Anteil der lärmarmen Güterwagen an der Station in Emmendingen bereits im Jahr 2020 überdurchschnittlich hoch. Unter anderem kann die gestiegene Gleisrauheit den Pegelanstieg bewirkt haben. Des Weiteren ist an der Station in Emmerich der Anteil lärmarmen Güterwagen um etwa 2 Prozent zum Jahr 2020 rückläufig. Die unterschiedlichen akustischen Gleiseigenschaften beeinflussen die Ergebnisse der Stationen.

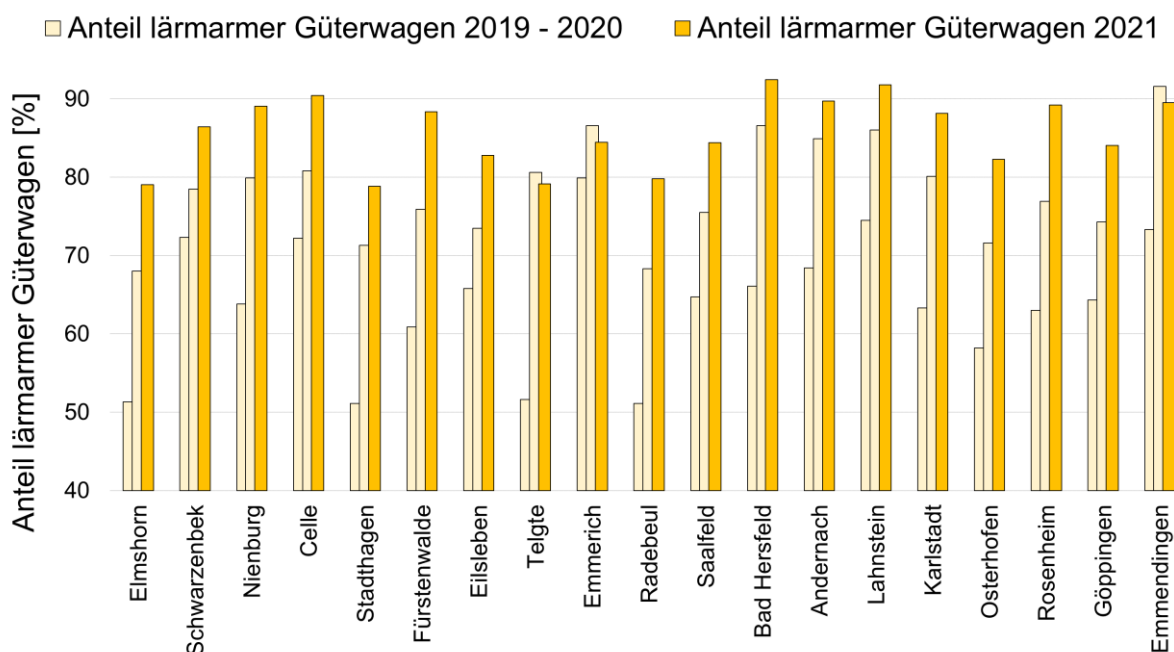


Abbildung 20: Anteil der als lärmarm registrierten Güterwagen an den einzelnen Messstationen im Jahr 2019 bis 2020 (hellgelb) und 2021 (gelb).

6.5 Zeitliche Entwicklung der Schallemissionen von Güterwagen

Das netzweite Lärm-Monitoring soll unter anderem die zeitliche Entwicklung der Schallemissionen von Güterwagen sichtbar machen. In Abbildung 21 ist dafür der auf 80 km/h und auf die Achsen pro Länge bezogene Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq,Tp,APL,80}$ für jeweils alle registrierten Güterwagen eines Monats als Häufigkeitsverteilung und energetischer Mittelwert dargestellt. Es wurden nur Fahrten mit mehr als 50 km/h ausgewertet.

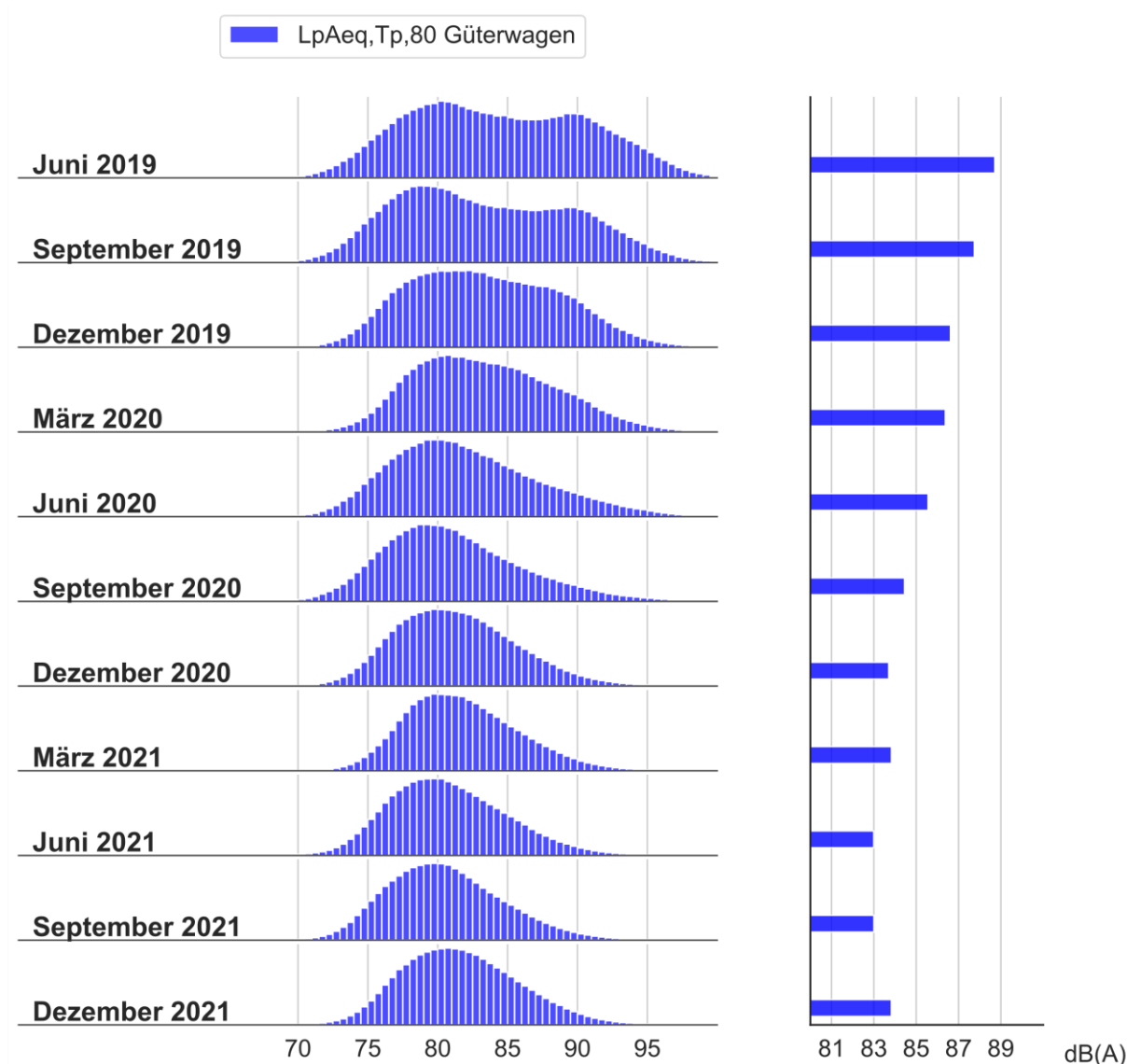


Abbildung 21: Zeitliche Entwicklung des auf 80 km/h bezogenen Vorbeifahrtpegel für Güterwagen, links als Häufigkeitsverteilung und rechts als energetischer Mittelwert.

Sowohl in den Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 21 als auch in den zugehörigen energetischen Mittelwerten ist die Schallpegelreduktion für den Vorbeifahrtpegel von Güterwagen seit Beginn der Messungen klar zu erkennen. Dabei ist zu sehen, wie der durch Güterwagen mit schlechten Radlaufflächen verursachte rechte Bereich der Verteilung stetig abnimmt und somit das Gewicht der Verteilung sich zu geringeren Schallpegeln hin verschiebt.

Auch für den Vorbeifahrtpegel ganzer Güterzüge ist dieser Effekt sichtbar (Abbildung 22). Hier wandert der rechte (lautere) Gipfel der Verteilung zu niedrigeren Schallpegeln hin. Dabei findet die Verschiebung hin zu kleineren Pegeln zeitlich verzögert zu der Darstellung der Güterwagen statt. Ursächlich ist, dass einige wenige laute Güterwagen den energetisch gemittelten Vorbeifahrtpegel eines Güterzuges bereits deutlich dominieren. Erst wenn keine lauten Güterwagen im Güterzug sind, sinkt der Vorbeifahrtpegel des Zuges merklich.

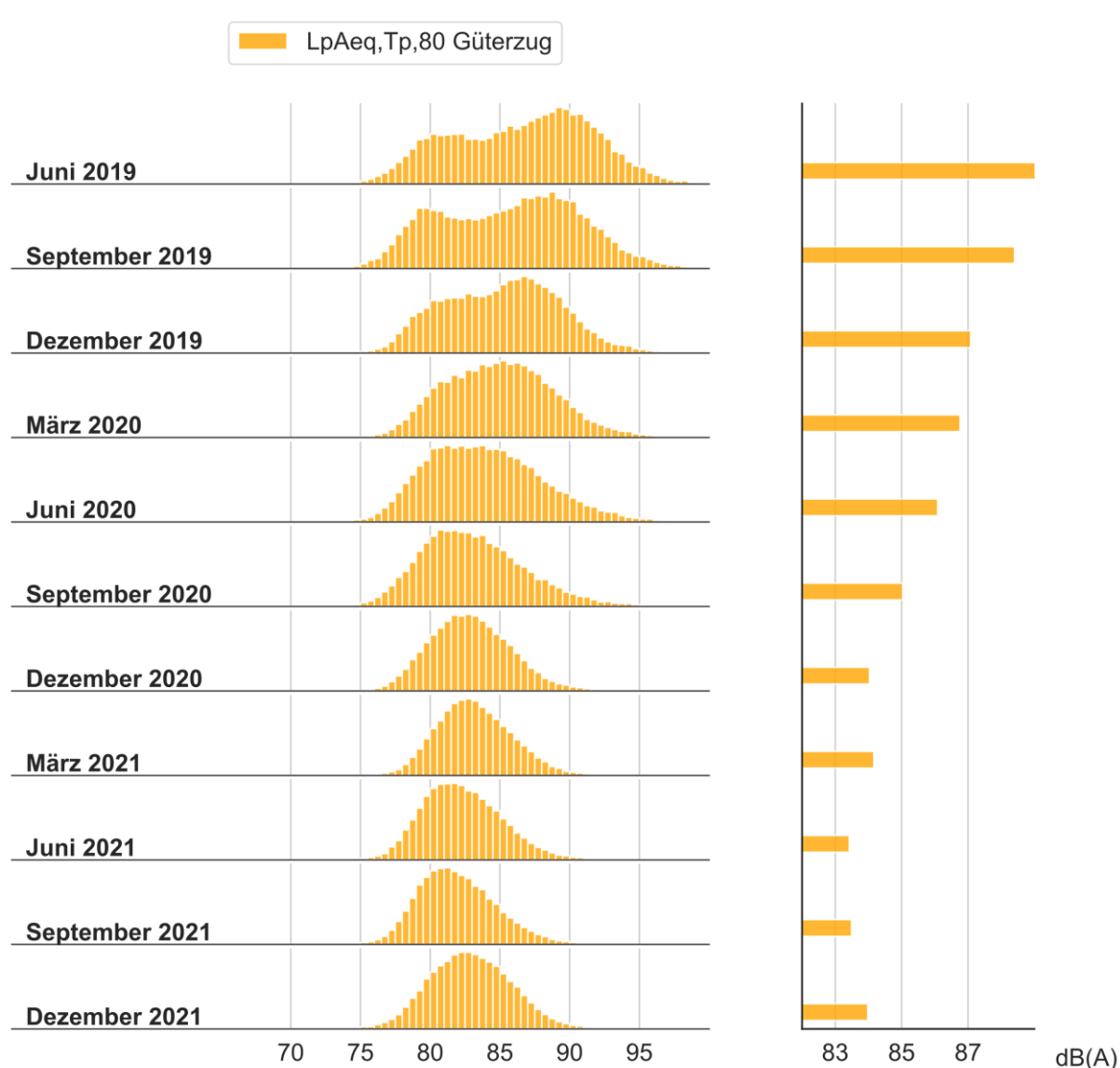


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung des auf 80 km/h bezogenen Vorbeifahrtpegel für Güterzüge, links als Verteilung und rechts als energetischer Mittelwert.

Aus Abbildung 21 wurde der Anteil der lärmarmen Güterwagen mit einem Vorbeifahrtpegel von unter 86 dB(A) extrahiert und in Abbildung 23 dargestellt. Während im Mai 2019 nur 57 Prozent der gemessenen Güterwagen als lärmarm klassifiziert werden konnten, stieg der Anteil im September 2021 auf etwa 90 Prozent. In den folgenden Herbst-Monaten geht der Anteil leicht zurück. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass im Herbst Laub und Witterung zu rutschigeren Schienen führen, welche die Bildung von Raddefekten begünstigen und so höhere Vorbeifahrtpegel von Güterwagen verursachen können.

An dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, dass Güterwagen, die als lärmarm klassifiziert wurden, sicher auf Verbundstoffbremssohlen umgerüstet wurden. Nicht lärmarme Güterwagen sind jedoch in der Regel auch nicht mit Grauguss-Bremssohlen ausgestattet. Auch umgerüstete Güterwagen, die in einem akustisch ungünstigen Zustand sind, können diesen Wert überschreiten. Ungünstige akustische Gleiseigenschaften an einzelnen Messstationen verstärken den Effekt. Die Ergebnisse der Kontrollen des Eisenbahn-Bundesamts zeigen, dass im Jahr 2021 nur mit 0,3 Prozent der überprüften Güterwagen gegen das Betriebsverbot für laute Güterwagen vorstoßen wurde.

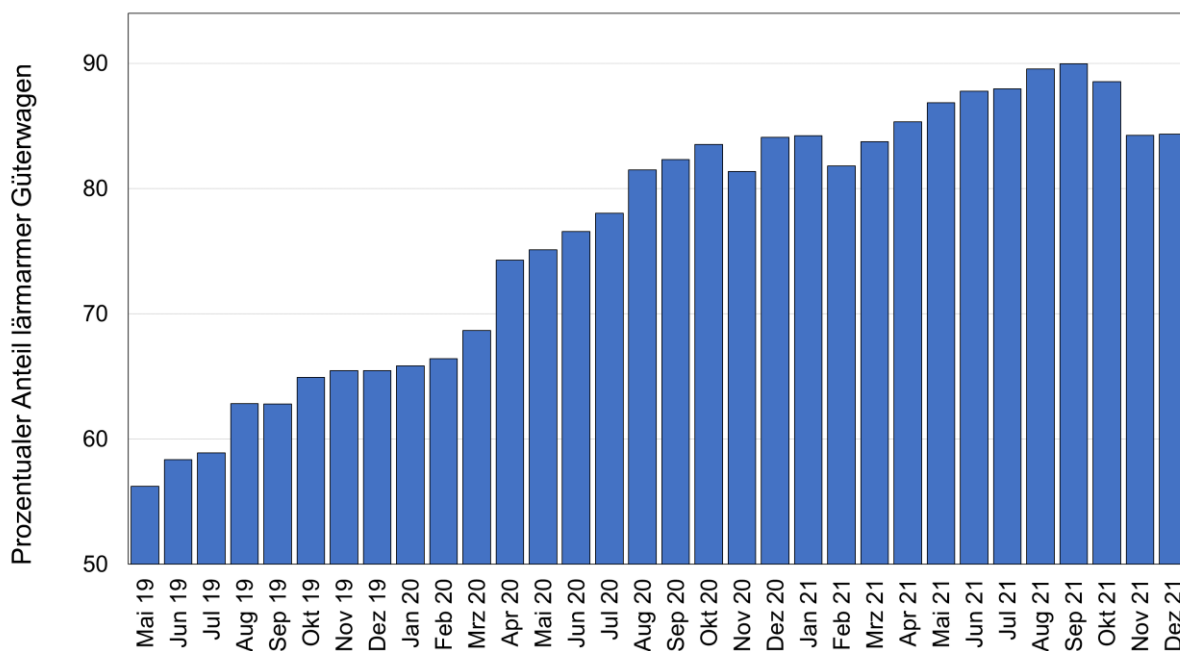


Abbildung 23: Prozentualer Anteil als lärmarm klassifizierter Güterwagen mit einem Vorbeifahrtpegel von unter 86 dB(A) dargestellt über die Monate seit im Betriebnahme Mai 2019 bis Dezember 2021.

1 Anhang: Messkonzept

Das Lärm-Monitoring erfolgt an zweigleisigen Strecken gemäß der E DIN 38452-1:2020-03; Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen – Teil 1: Emissionen; Entwurf März 2020 [2] mit der Qualitätsstufe 3.

Technischer Aufbau der Messstationen und Durchführung der Messungen

Damit das Lärm-Monitoring dauerhaft valide und möglichst vergleichbare Messergebnisse liefert, müssen alle Messstationen identisch aufgebaut sein: Sie weisen die gleiche Technik und Auswerteroutine auf. Sie erfassen die Schallereignisse in vergleichbarer Umgebung und dem gleichen Abstand zum Gleis.

Je Station wurden zwei Messquerschnitte je Gleis mit je zwei Mikrofonen eingerichtet. Die Messung ist so konzipiert, dass die 7,5 Meter Mikrofonabstände in Bezug auf die Gleismitte, jeweils über ein Gleis hinweg, gemessen werden.

Die wichtigsten Komponenten sind Mikrofone der Klasse 1, Achszähler und eine Steuerungseinheit mit Mobilfunkverbindung.

Der Achszähler erfasst jede Achsüberfahrt des Zuges. Aus seinen Signalen wird die Zugvorbeifahrt mit Zeitpunkt, Vorbeifahrtdauer sowie Geschwindigkeit und Länge des Zuges erfasst.

Schalldruck und Signale der Achszähler werden an die Steuerungseinheit gesendet. Diese berechnet hieraus die Kenngrößen (z. B. Maximal-, Vorbeifahrt- und Mittelungspegel und Zuglänge, -geschwindigkeit und -kategorie) und übermittelt sie an einen zentralen Server. Dort werden die Daten aller Messstationen gespeichert.

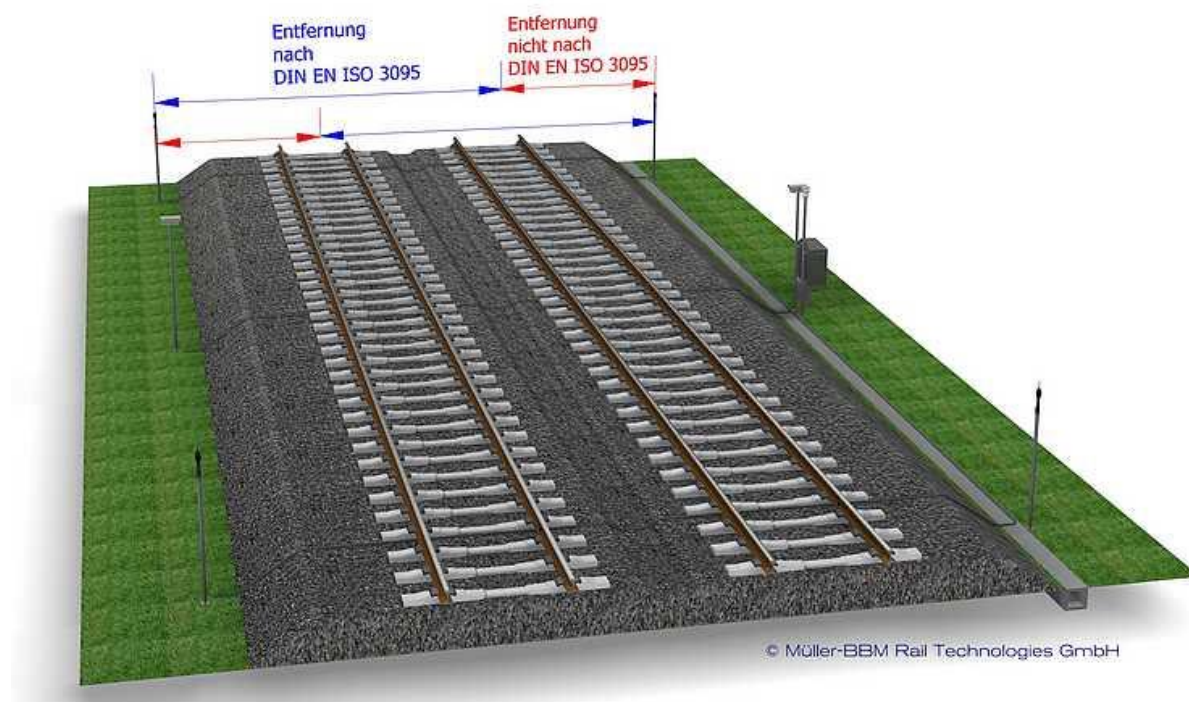


Abbildung 24: Messaufbau (schematisch).

Ungültige Messungen: Für eine korrekte Messung muss die Zugvorbeifahrt in 7,5 Meter Entfernung zum Mikrofon stattfinden. Genauso dürfen keine Fremdgeräusche die Messung beeinflussen. Ist eine der beiden Bedingungen nicht eingehalten, sind die Messungen ungültig.

- Begegnen sich zwei Züge am Standort der Messstation, ist eine normgerechte Messung nicht möglich.
- Störende Witterungsverhältnisse (z. B. Starkregen) sowie zu hohe Hintergrundgeräusche führen zu ungültigen Daten.

Ebenfalls führen Arbeiten am Gleis zu Daten, die nicht verwertbar sind. Auch ein Ausfall der Technik ist nicht zu 100 Prozent auszuschließen.

Daten, die nicht nach Norm gemessen wurden, werden verworfen und durch möglichst ähnliche, gültige Daten gemäß E DIN 38452-1:2020-03 [2] ersetzt. Dadurch erhöht sich die Genauigkeit und Aussagekraft der Daten für die Langfrist-Auswertungen.

Beispiel: Die Daten eines vorbeifahrenden, langen Güterzugs sind wegen Starkregen ungültig. Werden diese Daten nun in der weiteren Bearbeitung, z. B. für die Berechnung des Mittelungspegels, ignoriert, wird dieser nur auf Basis der normgerechten Daten berechnet. Das kann zu Verzerrungen des Mittelungspegels führen – insbesondere, wenn auf der Strecke ansonsten eher leisere Züge verkehren. Werden nicht nach Norm gemessene Daten des Güterzugs aber mit ähnlichen, normgerechten Daten ersetzt, können sie in der Berechnung des Mittelungspegels berücksichtigt werden. Er bildet damit besser die realen Bedingungen ab.

2 Anhang: Messgrößen

2.1 Vorbeifahrtexpositionspegel TEL

A-bewerteter Schallpegel einer Zugvorbeifahrt als energetischer Mittelwert über die Schallereignisdauer T normiert auf die Vorbeifahrtzeit T_p . Der TEL ist damit ein Maß, um die gesamte akustische Energie einer Zugvorbeifahrt zu erfassen.

$$TEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (1)$$

mit

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (Bezugsschalldruck)

$T_p = T_2 - T_1 =$ geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges

$T =$ Schallereignisdauer/Messdauer (enthält alle Werte Schallwerte vor und nach der Zugvorbeifahrt bis die Pegel auf mehr als 10 dB(A) unter den Wert während der Vorbeifahrt abgesunken ist)

2.2 A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel $L_{Aeq,Tp}$

Der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{Aeq,Tp}$ entspricht dem, über die Messdauer T_p energetisch gemittelten A-bewerteten Schalldruckpegel nachfolgender Gleichung:

$$L_{Aeq,Tp} = 10 \log \left(\frac{1}{T_p} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (2)$$

mit

$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (Bezugsschalldruck)

$T_p = T_2 - T_1 =$ geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges

2.3 AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel L_{AFmax}

Maximalwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, der während der Messdauer T bei Anwendung der Zeitbewertung F (fast) bestimmt wird.

2.4 Schallexpositionspegel SEL

Der Schallexpositionspegel SEL bezieht die akustische Schallenergie auf eine Sekunde. Er wird für die Berechnung des Mittelungspegel L_m verwendet und hat die nachstehende Beziehung mit dem Vorbeifahrtexpositionspegel TEL :

$$SEL = TEL - 10 \log (T_0 / T_p) \quad (3)$$

mit

$T_0 = 1$ Sekunde

$T_p = T_2 - T_1 =$ geometrische Vorbeifahrtzeit des Zuges

2.5 Vorbeifahrtexpositionspegel für die Bezugsgeschwindigkeit 80 km/h TEL_{80}

Der mit der Vorbeifahrtgeschwindigkeit v wie folgt auf die Geschwindigkeit 80 km/h umgerechnete Vorbeifahrtexpositionspegel TEL wird i. d. R. für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messstellen ermittelt und errechnet sich aus:

$$TEL_{80} = TEL - 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (4)$$

mit

$v_0 = 80$ km/h (Bezugsgeschwindigkeit)

2.6 Dauerschalldruckpegel der Vorbeifahrt bezogen auf 80 km/h $L_{Aeq, Tp, 80}$

Der mit der Vorbeifahrtgeschwindigkeit v wie folgt auf die Geschwindigkeit 80 km/h umgerechnete A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{Aeq, Tp, 80}$ wird i. d. R. für die Auswertung einzelner Wagen und Loks errechnet:

$$L_{Aeq, Tp, 80} = L_{Aeq, Tp} - 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (5)$$

mit

$v_0 = 80$ km/h (Bezugsgeschwindigkeit)

2.7 Dauerschalldruckpegel korrigiert auf Achsen pro Länge $L_{Aeq, Tp, APL, 80}$

Für die Auswertung einzelner Güterwagen wird in Anlehnung an TSI Lärm (2014) [1] der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel bezogen auf 80 km/h zusätzlich auf die Anzahl Achsen pro Länge wie folgt normiert:

$$L_{Aeq, Tp, APL, 80} = L_{Aeq, Tp, 80} - 10 \cdot \log\left(\frac{APL}{0,225}\right) \quad (6)$$

mit

$APL =$ Anzahl Achsen geteilt durch Länge des Wagens in Meter.

2.8 Mittelungspegel L_m

A-bewerteter mittlerer Schalldruckpegel bezogen auf 7,5 Meter Abstand von der Gleisachse für den Zeitraum Tag, Nacht oder 24 Stunden.

Berechnung aus Summe aller Zugfahrten in einer Periode pro Gleis, pro Zugkategorie, pro Messstelle nach:

$$L_m = 10 \cdot \log \left(\sum 10^{\frac{SEL}{10}} \right) - A1$$

(7)

mit

$A1 = 10 \cdot \log(16 \cdot 3600)$ für die Tagperiode: $06:00:00 \leq \text{Einfahrtszeit } T < 22:00:00$

$A1 = 10 \cdot \log(8 \cdot 3600)$ für die Nachtperiode: $T < 6:00:00 \parallel T \geq 22:00:00$

$A1 = 10 \cdot \log(24 \cdot 3600)$ für 24 Stundenperiode

SEL = Schallexpositionspegel einer Zugfahrt

Die Monats- und Jahresmittelwerte berechnen sich aus den energetischen Mittelwerten der entsprechenden Tageswerte:

$$L_{m, \text{Monat/Jahr}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum 10^{\frac{L_m}{10}} \right)$$

(8)

mit

n = Anzahl der Tage im Monat / Jahr

2.9 Mittlerer gewichteter Vorbeifahrtexpositionspegel für 80 km/h $mTEL80$

Berechnung pro Gleis, pro Periode, pro Zugkategorie, pro Tag bzw. pro Monat, pro Messstelle:

$$mTEL80 = 10 \cdot \log \left(\sum L_i \cdot 10^{\frac{TEL80_i}{10}} \right) + 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\sum L} \right)$$

(9)

mit

L = Zuglänge

$TEL80$ = Dauerschalldruckpegel der Vorbeifahrt bezogen auf 80 km/h

3 Anhang: Fehlerbetrachtung, Genauigkeitsbetrachtung, Messunsicherheiten

Die Messungen des Bahnlärm-Monitorings ermitteln Emissionskenngrößen einer Zugvorbeifahrt (TEL , $L_{pAeq,Tp}$) sowie Mittelungspegel L_m . Diese charakterisieren damit die Schallemission an einem Streckenabschnitt mit dessen Gleisparametern (Schienenrauheit und Abklingrate) für ein Fahrzeug/alle Fahrzeuge eines Zeitraums.

In diesem Anhang werden die Unsicherheiten der Kenngrößen als erweiterte Messunsicherheit U angegeben. Das verwendete Verfahren basiert auf E DIN 38452-1:2020-03 und ist ISO/IEC Guide 98-3:2008 zu entnehmen.

Die folgenden Begriffe werden verwendet:

- Standardunsicherheit u : Unsicherheit eines Messergebnisses, ausgedrückt als Standardabweichung;
- kombinierte Standardunsicherheit u_c : Standardunsicherheit des Messergebnisses, wenn dieses Ergebnis aus Werten verschiedener anderer Größen gewonnen wird; die kombinierte Standardunsicherheit entspricht der positiven Wurzel der Summe der Ausdrücke, die die Varianzen oder Kovarianzen dieser anderen Größen darstellen, danach bewertet, wie das Messergebnis mit der Änderung dieser Größen variiert;
- Erweiterungsfaktor k : Zahlenwert, verwendet als Multiplikator für die kombinierte Standardunsicherheit, um die erweiterte Unsicherheit zu berechnen. Es wird ein Erweiterungsfaktor $k=2$ verwendet.
- erweiterte Unsicherheit U : Größe, die ein Intervall um das Messergebnis festlegt, von dem erwartet werden kann, dass es einen großen Teil der Verteilung der Werte umfasst, die sinnvoll der Messgröße zugeordnet werden können.

3.1 Messunsicherheit für den Expositionspegel TEL/ Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq,TP}$

Die angesetzten Eingangsgrößen und ihrer Unsicherheit sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Die Festlegungen zu den Messgeräten ergeben sich aus IEC 61672 und IEC 60942:2003. Die erwähnten Bereiche und Standardunsicherheiten sind für die verwendeten Geräte der Klasse 1 gültig.

Tabelle 5: Bestimmung der Unsicherheiten auf den $TEL/L_{pAeq,TP}$.

Eingabegröße X_i	Beschreibung	Standardunsicherheit $u(x_i)$
L_p	Ablesewert	0 dB(A)
Messgerät, Kalibrator	Einflüsse auf die Genauigkeit des Messgerätes und des Kalibrators (Klasse 1)	0,78 dB(A)
Mess- und aufstellbedingungen	Einflüsse aus Ungenauigkeiten der Mess- und Aufstellbedingungen wie Ungenauigkeiten in der Erfassung der Vorbeifahrtzeit, Abweichungen im Messabstand, Änderung des Bodenniveaus, Wellenreflexion am Stativ und Dämpfung des Windschirms, Fremdgeräusch, Varianz der Gleisbedingungen	0,52 dB(A)
Auswertung	Einflüsse aus Fehlern/Ungenauigkeiten in der Auswertung wie z.B. falsch erkannte Zugkategorie, Ersetzen von Zügen	0,5 dB(A)
	kombinierte Standardunsicherheit u_c	1,1 dB(A)
	erweiterte Unsicherheit U ($k=2$)	2,1 dB(A)

Die Messwerte für den Expositionspegel $TEL/$ Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq,TP}$ liegen damit mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent in einem Intervall von $\pm 2,1$ dB(A) um den gemessenen Wert.

Bei der Bestimmung des Vorbeifahrtpegels für einzelne Fahrzeuge wird jedem Wagen der Schalldruckpegel, der während der Vorbeifahrt von Puffer zu Puffer gemessen wird, zugeordnet. Der Pegel eines leiseren Fahrzeugs kann dabei zu groß ermittelt werden, wenn das benachbarte Fahrzeug deutlich lauter ist.

3.2 Messunsicherheit für Monatsmittelungspegel $L_{m, \text{Monat}}$

Die angesetzten Eingangsgrößen und ihrer Unsicherheit sind in der folgenden Tabelle angegeben. Die Unsicherheiten reduzieren sich im Vergleich zu den Kenngrößen der Zugvorbeifahrt infolge der statischen Mittelungseffekten vieler Zugvorbeifahrten über eine Monatszeitraum.

Die Festlegungen zu den Messgeräten ergeben sich aus IEC 61672 und IEC 60942:2003. Die erwähnten Bereiche und Standardunsicherheiten sind für die verwendeten Geräte der Klasse 1 gültig.

Tabelle 6: Bestimmung der Unsicherheiten auf den Monatsmittelungspegel L_m .

<i>Eingabegröße</i> <i>X_i</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Standardunsicherheit</i> <i>u(x_i)</i>
L_p	Ablesewert	0 dB(A)
<i>Messgerät, Kalibrator</i>	Einflüsse auf die Genauigkeit des Messgerätes und des Kalibrators (Klasse 1)	0,41 dB(A)
<i>Mess- und aufstellbedingungen</i>	Einflüsse aus Ungenauigkeiten der Mess- und Aufstellbedingungen wie Ungenauigkeiten in der Erfassung der Vorbeifahrtzeit, Abweichungen im Messabstand, Änderung des Bodenniveaus, Wellenreflexion am Stativ und Dämpfung des Windschirms, Fremdgeräusch, Varianz der Gleisbedingungen	0,52 dB(A)
<i>Auswertung</i>	Einflüsse aus Fehlern/Ungenauigkeiten in der Auswertung wie z.B. Ersetzen von Zügen	0 dB(A)
	kombinierte Standardunsicherheit u_c	0,7 dB(A)
	erweiterte Unsicherheit U ($k=2$)	1,3 dB(A)

Die Messwerte für den Monatsmittelungspegel L_m liegen damit mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent in einem Intervall von $\pm 1,3$ dB(A) um den gemessenen Wert.

3.3 Messunsicherheit für Jahresmittelungspegel $L_{m, \text{Jahr}}$

Die Einflussgrößen auf die Messunsicherheit des Jahresmittelungspegels sind vergleichbar derjenigen des Monatsmittelungspegels. Der größere Zeitraum der Mittelung hat keine wesentlichen Auswirkungen auf die Messunsicherheit.

Die Messunsicherheit für den Jahresmittelungspegel kann analog zur Messunsicherheit für den Monatsmittelungspegel angenommen werden. Damit kann, bei einem Erweiterungsfaktor von $k=2$, von einer erweiterten Unsicherheit U von 1,3 dB(A) ausgegangen werden.

4 Anhang: Kennzahlen 2021

Nachfolgend sind eine Reihe der graphisch dargestellten Kennzahlen tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 7: Mittelungspegel und mittlere Zugkennzahlen für den Zeitraum von 24h.

Standort	Zeitraum	Mittelungspegel 2021	Mittlere Anzahl Züge	Anzahl Güterzüge	Mittlere Achszahl	Mittlere Zuglänge	Mittlere Geschwindigkeit
Elmshorn	24h	70,2	287	38	33	205	130
Schwarzenbek	24h	69,2	160	58	63	342	118
Celle	24h	68,6	173	99	82	375	100
Nienburg	24h	71,2	212	124	76	408	115
Stadthagen	24h	71,7	271	124	61	307	118
Eilsleben	24h	69,9	179	105	68	339	95
Emmerich	24h	67,2	119	65	78	354	101
Andernach	24h	68,7	215	86	62	315	103
Lahnstein	24h	67,4	149	103	75	400	83
Bad Hersfeld	24h	71,5	342	186	67	354	106
Saalfeld	24h	62,7	97	24	29	156	111
Radebeul	24h	68,8	125	55	63	327	104
Karlstadt	24h	72,1	289	195	75	390	94
Göppingen	24h	66,0	199	40	36	214	101
Osterhofen	24h	70,0	155	92	70	363	108
Emmendingen	24h	70,8	260	153	63	328	104
Rosenheim	24h	70,0	228	92	50	310	117
Fürstenwalde	24h	67,7	146	55	57	292	117
Telgte	24h	70,3	180	55	53	287	137

Tabelle 8: Mittelungspegel und mittlere Zugkennzahlen für den Zeitraum Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) und Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr).

Standort	Zeitraum	Mittelungspegel	Mittlere Anzahl Züge	Anzahl Güterzüge	Mittlere Achszahl	Mittlere Zuglänge	Mittlere Geschwindigkeit
Elmshorn	Nacht	68,3	53	13	38	222	127
	Tag	70,9	233	26	32	202	131
Schwarzenbek	Nacht	68,8	37	24	86	443	103
	Tag	69,3	123	34	56	311	122
Celle	Nacht	68,7	49	36	102	458	96
	Tag	68,5	124	63	74	343	102
Nienburg	Nacht	71,5	68	51	90	470	105
	Tag	71,0	144	73	69	378	119
Stadthagen	Nacht	71,5	71	48	80	369	103
	Tag	71,9	200	76	54	286	124
Eilsleben	Nacht	70,2	56	41	82	397	89
	Tag	69,7	123	64	62	313	97
Emmerich	Nacht	67,0	33	23	92	425	94
	Tag	67,2	86	42	72	326	104
Andernach	Nacht	69,0	61	37	81	394	95
	Tag	68,6	155	49	55	283	106
Lahnstein	Nacht	68,3	50	43	92	485	83
	Tag	66,9	99	59	66	356	83
Bad Hersfeld	Nacht	72,2	109	77	81	416	98
	Tag	71,1	233	109	60	325	109
Saalfeld	Nacht	62,8	20	9	44	221	107
	Tag	62,6	77	14	25	138	113
Radebeul	Nacht	68,4	29	20	84	415	97
	Tag	69,0	96	36	57	301	106
Karlstadt	Nacht	72,5	89	70	87	448	94
	Tag	71,8	200	125	69	364	95
Göppingen	Nacht	65,4	42	16	45	252	93
	Tag	66,3	157	24	34	204	103
Osterhofen	Nacht	69,7	43	32	82	415	100
	Tag	70,2	112	60	65	343	111
Emmendingen	Nacht	69,9	63	45	73	361	97
	Tag	71,1	197	108	60	317	107
Rosenheim	Nacht	69,3	48	32	65	374	107
	Tag	70,3	180	60	46	292	120
Fürstenwalde	Nacht	66,4	32	19	76	364	103
	Tag	68,2	115	37	52	272	121
Telgte	Nacht	69,7	45	26	70	365	117
	Tag	70,5	135	30	47	262	144

Tabelle 9: Statistische Pegelwerte für Personenzüge an allen Stationen jeweils für den Zeitraum Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) und Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr).

Standort	Zeitraum	Mittelungspegel	L_{Aeq}	TEL	$L_{A_{fmax}}$	TEL80
Elmshorn	Nacht	64,0	86,6	86,8	90,1	79,9
	Tag	68,9	86,5	86,7	90,5	79,9
Schwarzenbek	Nacht	59,9	85,6	85,8	90,2	79,9
	Tag	65,8	86,0	86,2	90,2	79,5
Celle	Nacht	52,2	80,6	81,0	83,6	77,1
	Tag	57,0	80,5	80,9	84,1	76,5
Nienburg	Nacht	61,1	86,2	86,4	90,5	79,4
	Tag	64,3	86,5	86,7	90,7	79,0
Stadthagen	Nacht	61,3	85,7	86,0	89,1	79,6
	Tag	67,8	87,2	87,5	90,9	79,3
Eilsleben	Nacht	58,0	83,2	83,5	87,9	82,0
	Tag	61,2	84,0	84,3	88,7	81,4
Emmerich	Nacht	55,3	82,7	82,9	87,4	80,2
	Tag	59,3	84,2	84,4	87,6	79,5
Andernach	Nacht	59,4	82,0	82,7	87,9	79,0
	Tag	63,6	83,0	83,5	88,0	78,4
Lahnstein	Nacht	52,2	79,7	79,8	83,1	79,5
	Tag	53,4	77,8	78,0	80,5	77,4
Bad Hersfeld	Nacht	63,7	86,4	86,5	93,2	82,3
	Tag	63,6	83,6	83,9	89,6	78,5
Saalfeld	Nacht	50,4	80,5	80,9	82,9	76,2
	Tag	55,3	80,3	81,1	83,7	76,1
Radebeul	Nacht	56,6	85,5	85,7	89,1	81,7
	Tag	61,4	84,3	84,5	88,2	80,0
Karlstadt	Nacht	57,7	82,3	82,5	86,4	78,5
	Tag	56,3	79,8	80,2	82,8	76,8
Göppingen	Nacht	58,0	80,9	81,2	84,9	78,5
	Tag	63,8	82,3	82,6	87,5	78,5
Osterhofen	Nacht	56,9	83,8	84,1	88,1	78,8
	Tag	59,6	83,7	84,1	87,4	77,8
Emmendingen	Nacht	59,3	83,6	83,8	87,7	79,5
	Tag	63,9	83,7	83,9	87,6	79,2
Rosenheim	Nacht	59,2	84,9	85,0	87,5	80,1
	Tag	65,5	84,8	85,0	88,0	79,0
Fürstenwalde	Nacht	58,1	85,2	85,4	89,7	80,3
	Tag	64,8	87,1	87,3	91,4	80,4
Telgte	Nacht	62,1	87,7	87,9	91,0	79,3
	Tag	67,9	88,8	89,0	92,2	79,4

Tabelle 10: Mittelungspegel und mittlere Vorbeifahrtpegel/ Vorbeifahrtexpositionspegel für Güterzüge an allen Stationen jeweils für den Beurteilungszeitraum Tag (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) und Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr).

Standort	Zeitraum	Mittelungspegel	L_{Aeq}	TEL	$L_{A_{fmax}}$	TEL80
Elmshorn	Nacht	66,2	86,6	86,7	94,1	85,1
	Tag	66,6	86,8	86,9	94,5	85,5
Schwarzenbek	Nacht	68,1	85,2	85,3	92,2	83,4
	Tag	66,7	85,2	85,2	92,1	83,6
Celle	Nacht	68,6	83,8	83,8	91,0	82,3
	Tag	68,1	84,1	84,2	91,2	82,6
Nienburg	Nacht	71,1	85,1	85,2	92,6	83,1
	Tag	69,9	85,5	85,6	93,0	83,1
Stadthagen	Nacht	71,0	85,9	85,9	92,6	84,6
	Tag	69,5	86,0	86,1	92,3	84,6
Eilsleben	Nacht	69,8	85,1	85,2	92,1	84,1
	Tag	69,0	85,5	85,6	92,4	84,2
Emmerich	Nacht	66,6	83,8	83,9	91,2	82,8
	Tag	66,4	84,1	84,2	91,4	83,2
Andernach	Nacht	68,4	83,8	83,9	91,0	82,4
	Tag	66,8	84,4	84,5	91,3	82,8
Lahnstein	Nacht	68,1	82,5	82,6	90,0	82,2
	Tag	66,7	82,8	82,9	90,2	82,7
Bad Hersfeld	Nacht	71,5	83,8	83,8	91,5	82,4
	Tag	70,2	84,0	84,1	91,7	82,4
Saalfeld	Nacht	62,4	85,5	85,5	92,0	83,3
	Tag	61,6	85,5	85,6	92,5	83,7
Radebeul	Nacht	67,9	86,1	86,2	93,0	84,6
	Tag	67,8	86,4	86,5	93,2	84,9
Karlstadt	Nacht	72,3	85,0	85,1	92,6	83,4
	Tag	71,7	84,7	84,8	92,5	83,5
Göppingen	Nacht	64,5	83,7	83,8	91,0	84,0
	Tag	62,6	83,4	83,5	90,3	83,8
Osterhofen	Nacht	69,4	85,9	85,9	93,1	84,1
	Tag	69,7	86,4	86,5	93,4	84,4
Emmendingen	Nacht	69,5	84,7	84,8	90,6	84,5
	Tag	70,1	84,8	84,9	90,7	84,8
Rosenheim	Nacht	68,8	85,6	85,6	92,1	83,3
	Tag	68,5	85,4	85,5	92,1	83,1
Fürstenwalde	Nacht	65,7	84,3	84,4	91,5	82,4
	Tag	65,5	84,1	84,2	91,4	82,2
Telgte	Nacht	68,8	86,2	86,3	93,0	84,3
	Tag	67,0	86,5	86,5	93,3	85,1

Tabelle 11: Mittelungspegel, mittlere Vorbeifahrtpegel/ Vorbeifahrtexpositionspegel und mittlerer Vorbeifahrtexpositionspegel bezogen auf 80 km/h, sowie Zugkennzahlen für Personen- (PZ) und Güterzüge (GZ) an allen Stationen.

Standort	Tage in Betrieb	Zug-kategorie	L_m	L_{Aeq}	TEL	L_{max}	TEL80	Züge pro Tag	Achsen pro Zug	Mittlere Zuglänge	mittlere Geschwindigkeit
Elmshorn	365	PZ	67,8	86,5	86,8	90,4	79,9	240	24	164	138
		GZ	66,5	86,7	86,8	94,3	85,4	38	97	505	90
Schwarzenbek	365	PZ	64,6	86,0	86,2	90,2	79,5	99	33	216	135
		GZ	67,2	85,2	85,2	92,2	83,5	58	116	568	90
Celle	365	PZ	55,9	80,5	80,9	84,0	76,6	70	17	117	115
		GZ	68,3	84,0	84,0	91,1	82,5	99	130	569	91
Nienburg	365	PZ	63,5	86,4	86,6	90,6	79,1	81	30	197	144
		GZ	70,3	85,4	85,4	92,8	83,1	124	110	566	96
Stadthagen	365	PZ	66,5	87,1	87,3	90,7	79,4	136	32	205	144
		GZ	70,1	86,0	86,0	92,4	84,6	124	95	433	91
Eilsleben	365	PZ	60,4	83,8	84,1	88,5	81,5	68	21	135	104
		GZ	69,3	85,3	85,4	92,3	84,2	105	102	485	88
Emmerich	365	PZ	58,3	83,9	84,1	87,6	79,7	50	19	135	121
		GZ	66,4	84,0	84,1	91,3	83,1	65	125	534	87
Andernach	365	PZ	62,6	82,9	83,3	88,0	78,5	125	29	182	111
		GZ	67,4	84,1	84,2	91,2	82,6	86	112	514	91
Lahnstein	365	PZ	53,0	78,2	78,5	81,0	77,9	44	18	128	86
		GZ	67,2	82,7	82,8	90,1	82,5	103	101	521	82
Bad Hersfeld	365	PZ	63,6	84,4	84,6	90,6	79,5	144	23	156	125
		GZ	70,6	83,9	84,0	91,6	82,4	186	104	526	91
Saalfeld	365	PZ	54,2	80,3	81,0	83,6	76,1	70	11	79	118
		GZ	61,9	85,5	85,6	92,3	83,6	24	83	396	94
Radebeul	365	PZ	60,3	84,4	84,7	88,3	80,2	58	26	170	116
		GZ	67,8	86,3	86,4	93,1	84,8	55	108	534	91
Karlstadt	365	PZ	56,8	80,6	81,0	83,8	77,4	87	16	105	103
		GZ	71,9	84,8	84,9	92,5	83,4	195	103	528	90
Göppingen	365	PZ	62,5	82,1	82,4	87,2	78,5	155	24	167	106
		GZ	63,3	83,5	83,6	90,6	83,9	40	84	413	81
Osterhofen	365	PZ	58,9	83,7	84,1	87,5	78,0	56	23	161	134
		GZ	69,6	86,2	86,3	93,3	84,3	92	102	508	93
Emmendingen	365	PZ	62,8	83,7	83,9	87,6	79,3	100	33	224	136
		GZ	69,9	84,8	84,9	90,7	84,7	153	85	403	85
Rosenheim	365	PZ	64,2	84,8	85,0	87,9	79,2	131	25	190	133
		GZ	68,6	85,5	85,5	92,1	83,2	92	87	495	96
Fürstenwalde	365	PZ	63,5	86,9	87,0	91,2	80,4	84	25	157	133
		GZ	65,6	84,2	84,2	91,4	82,3	55	113	531	94
Telgte	365	PZ	66,7	88,6	88,9	92,0	79,4	120	29	189	159
		GZ	67,7	86,3	86,4	93,2	84,8	55	107	514	91

5 Anhang: Schienenrauheit und Abklingrate 2021

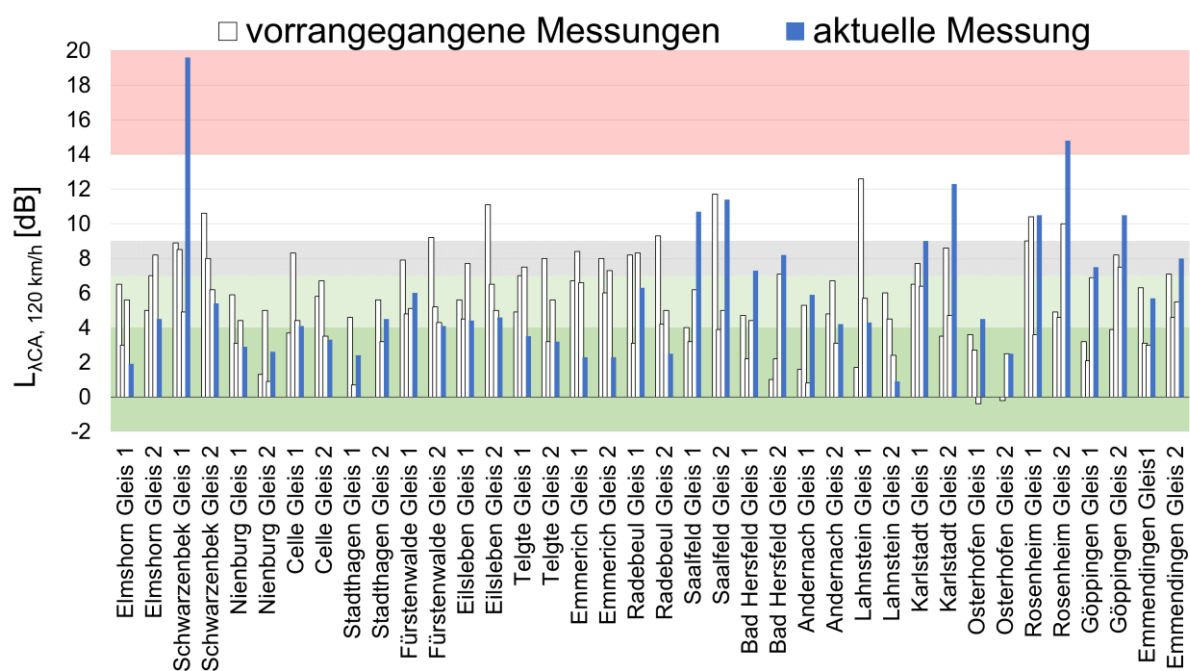


Abbildung 25. Rauheits-Einzahlwerte L_{ACA} in dB(A) für alle Messquerschnitte aller Messstandorte mit der Bezugs-Geschwindigkeit 120 km/h. Die grauen Balken repräsentieren die Ergebnisse der Initialmessung und die blauen Balken zeigen die Ergebnisse der zweiten Messung.

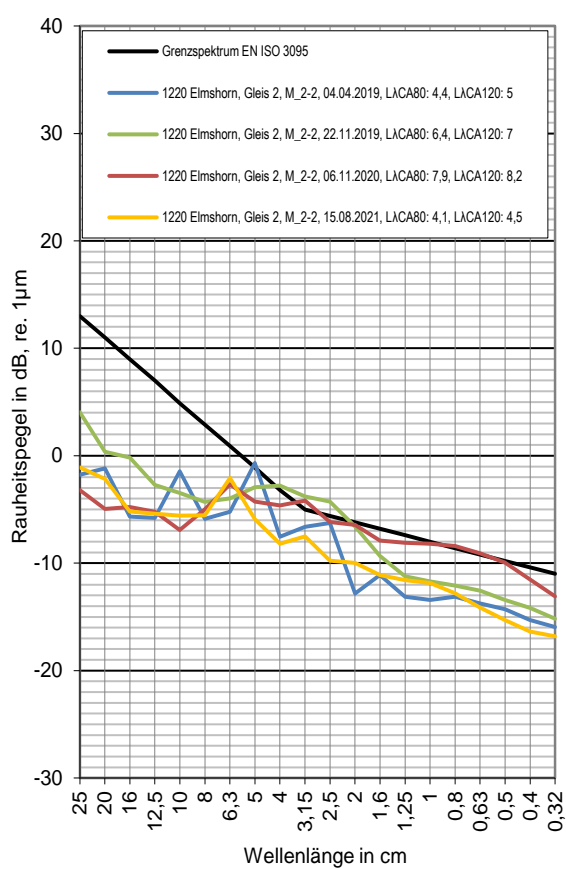
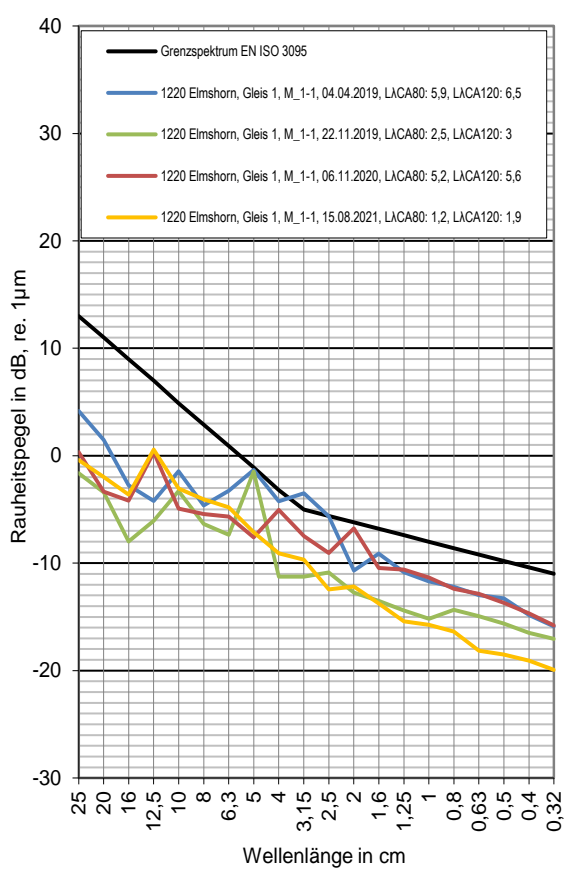
Messstelle Elmshorn

Strecke 1220, km 27,4

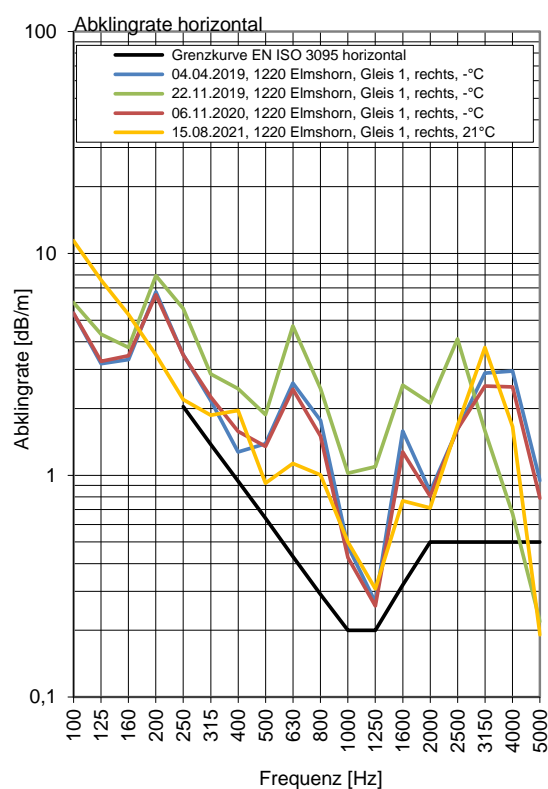
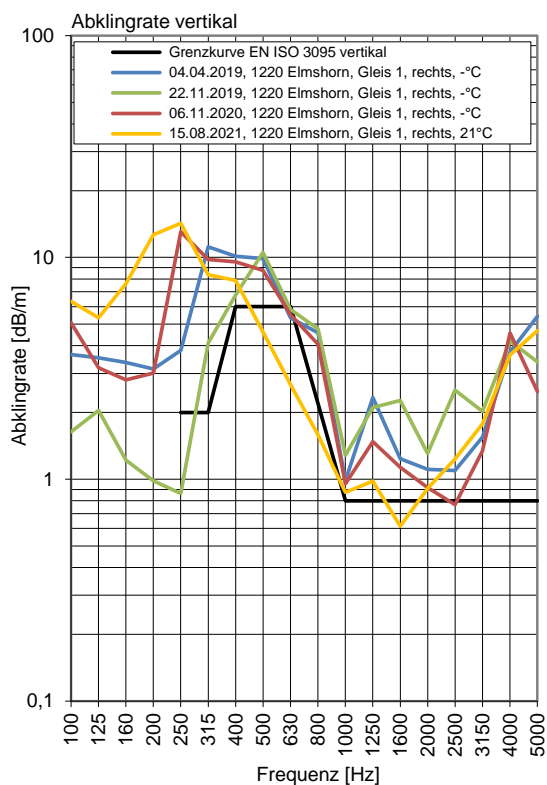
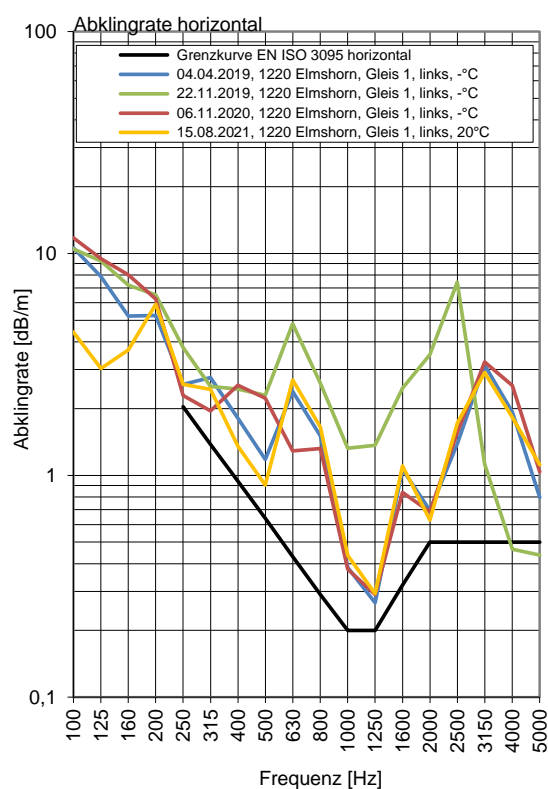
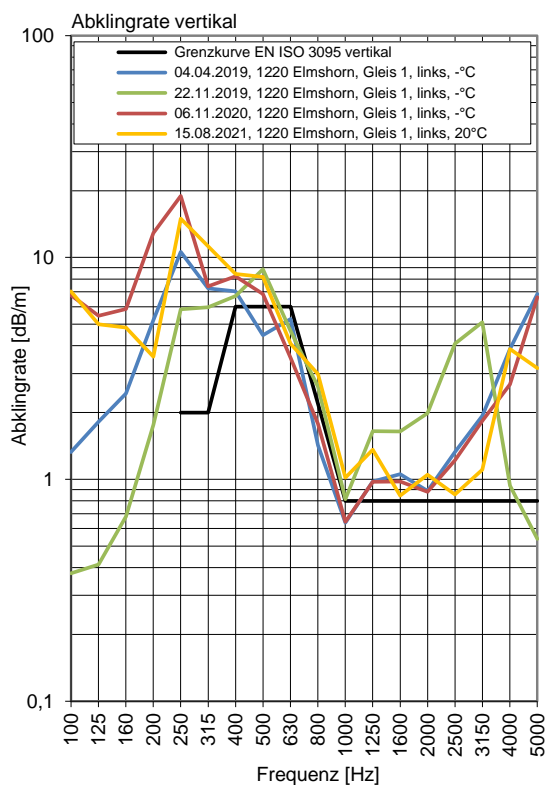
Gleis 1: Richtung Kiel

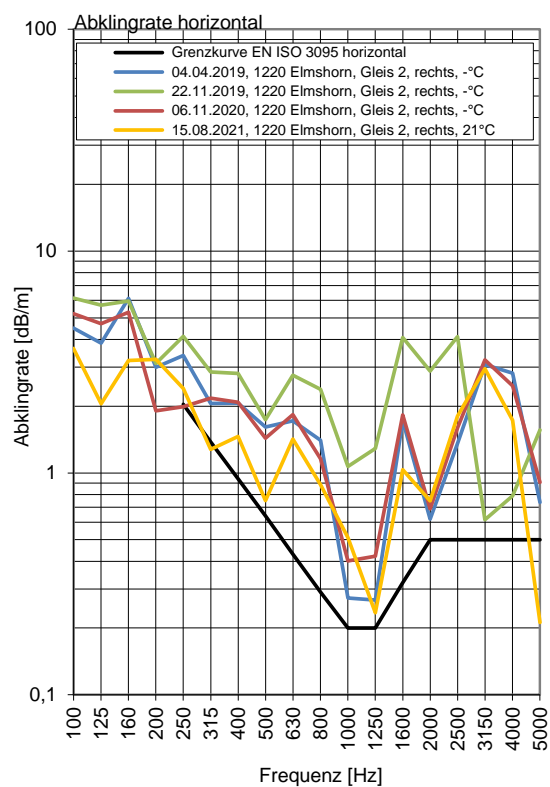
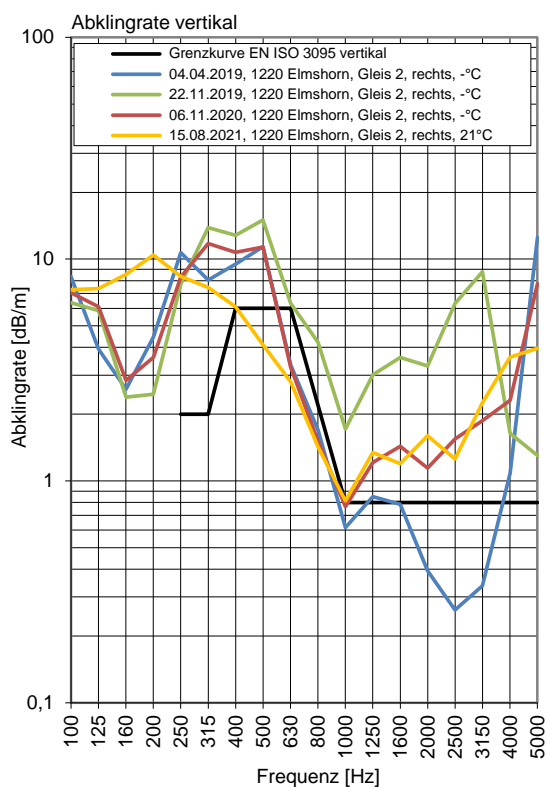
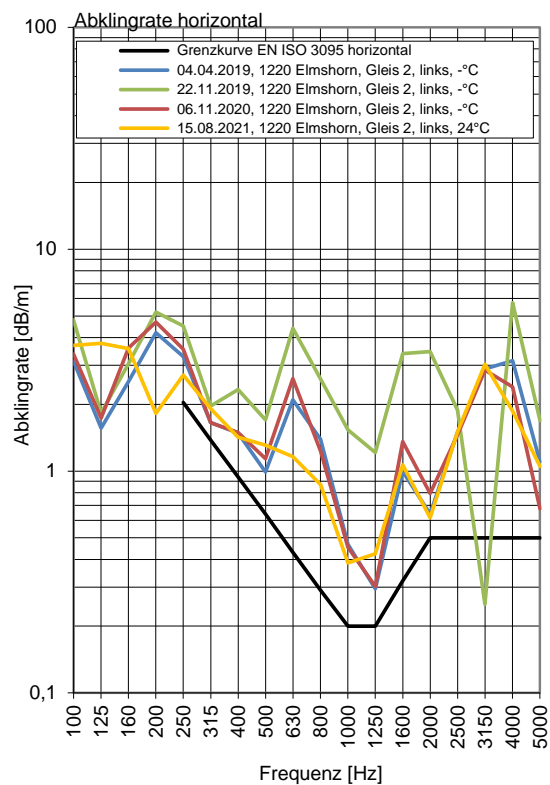
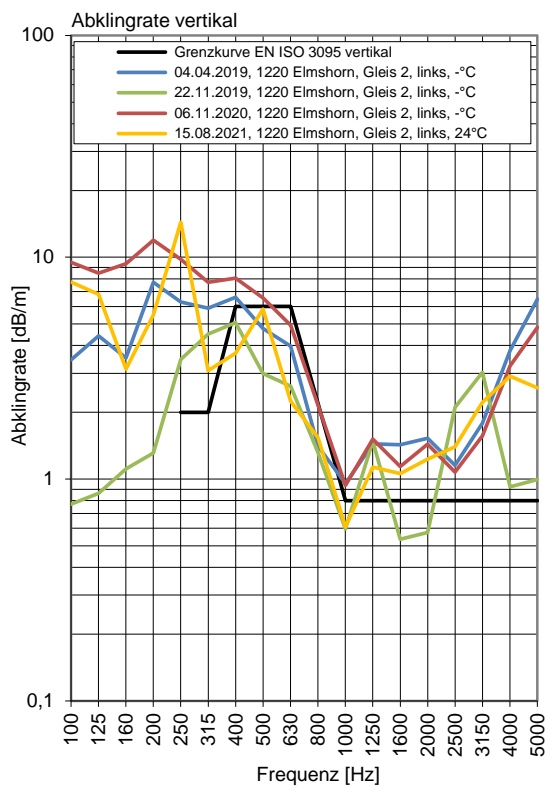
Gleis 2: Richtung Hamburg

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





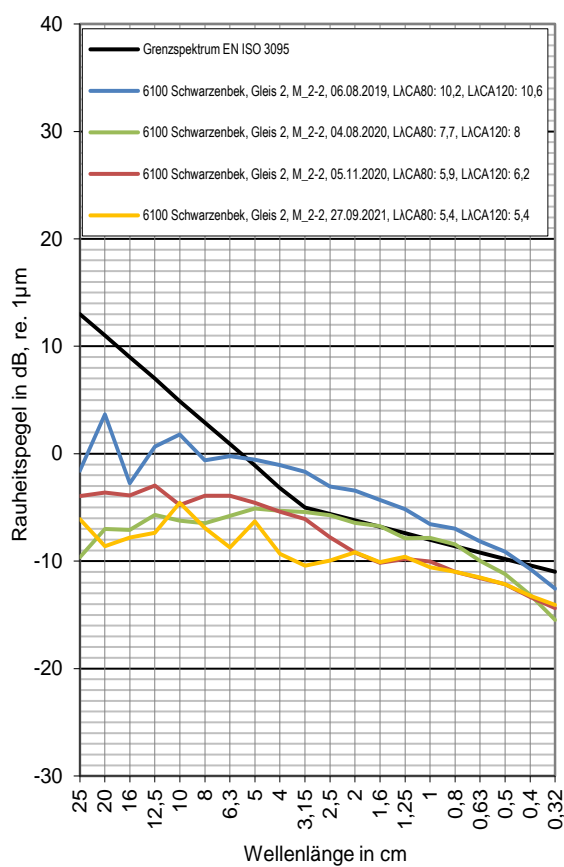
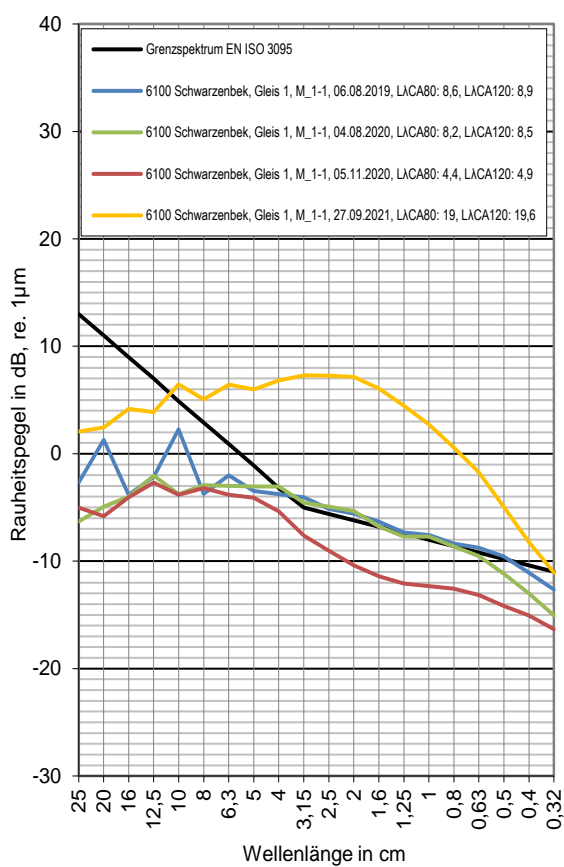
Messstelle Schwarzenbek

Strecke 6100, km 242,1

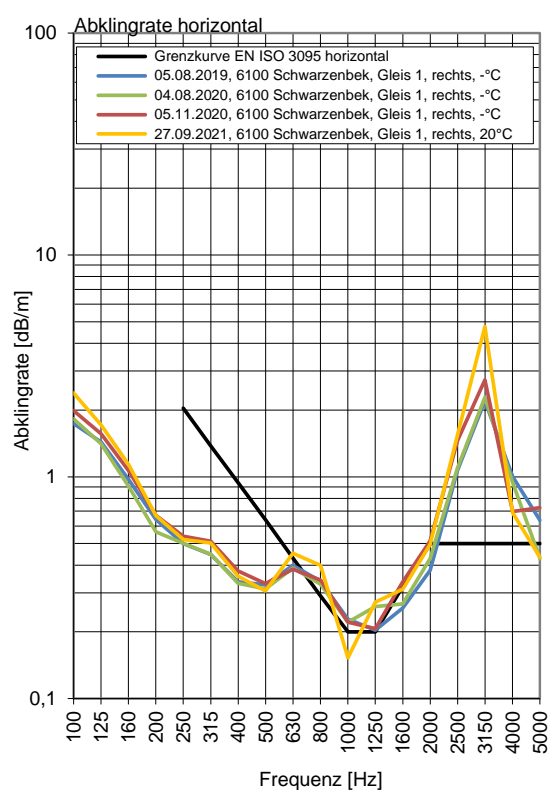
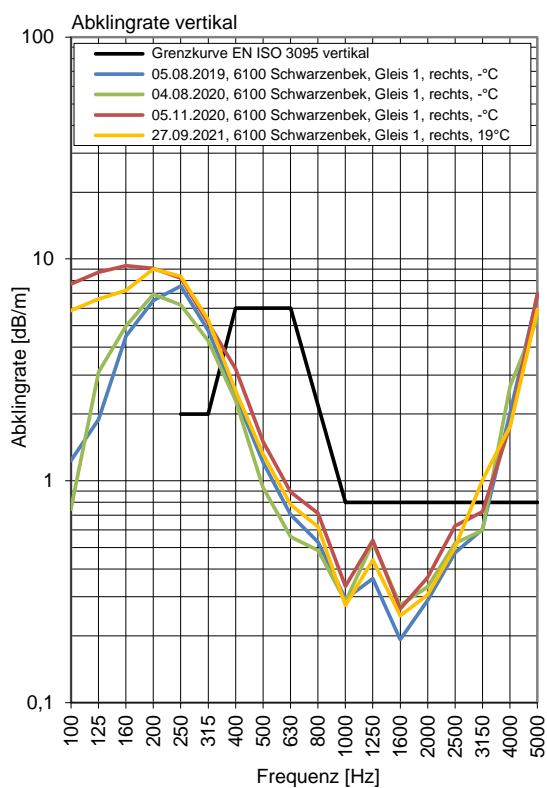
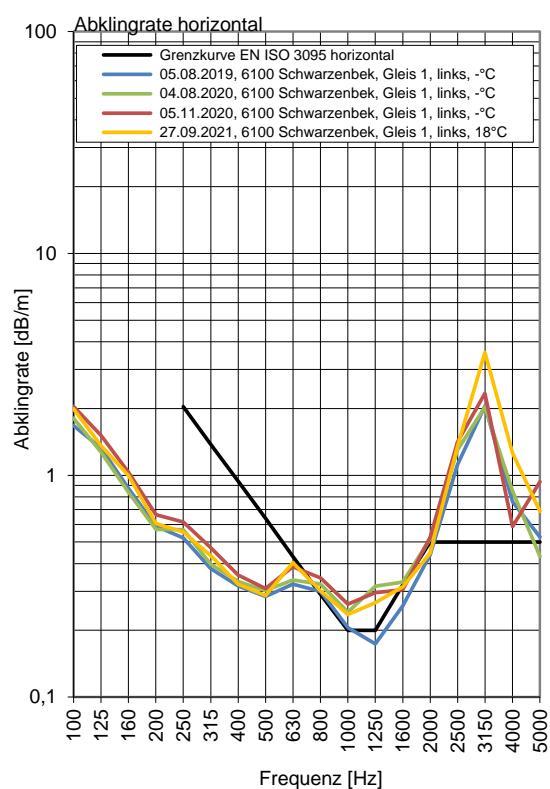
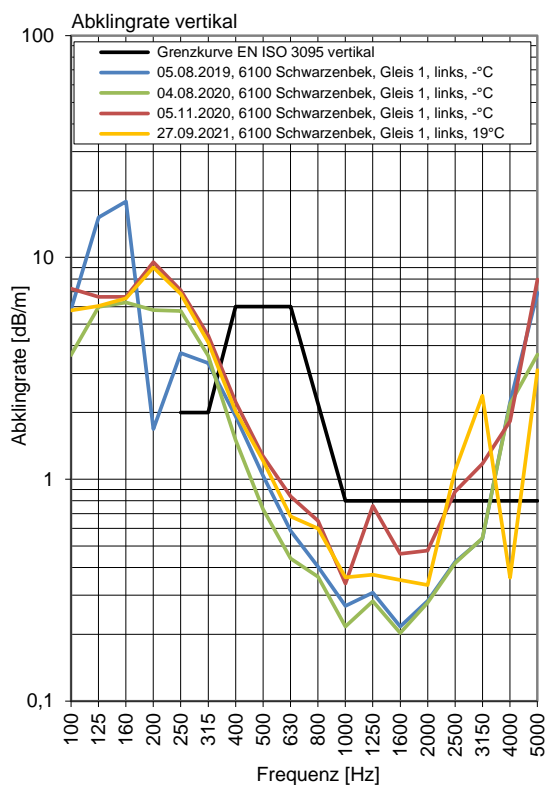
Gleis 1: Richtung Hamburg

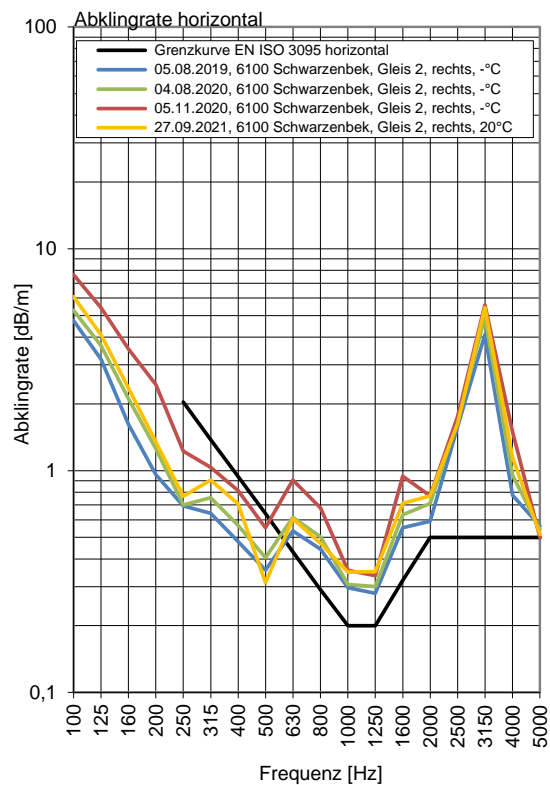
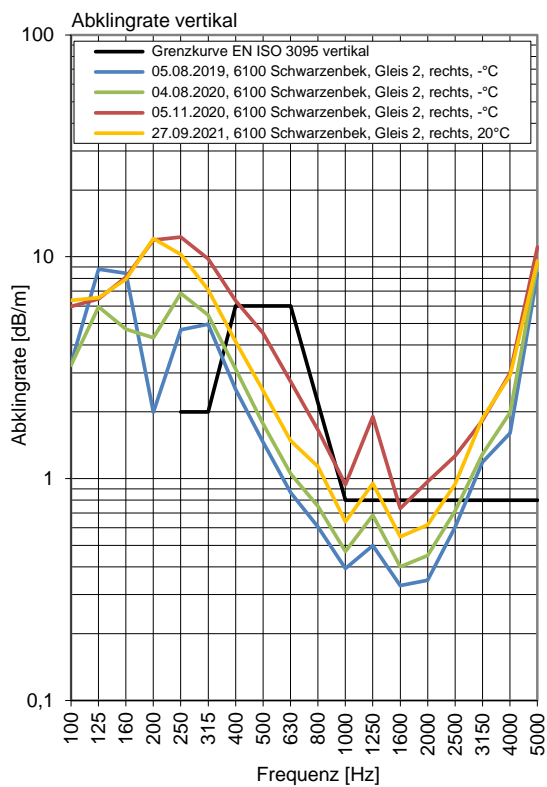
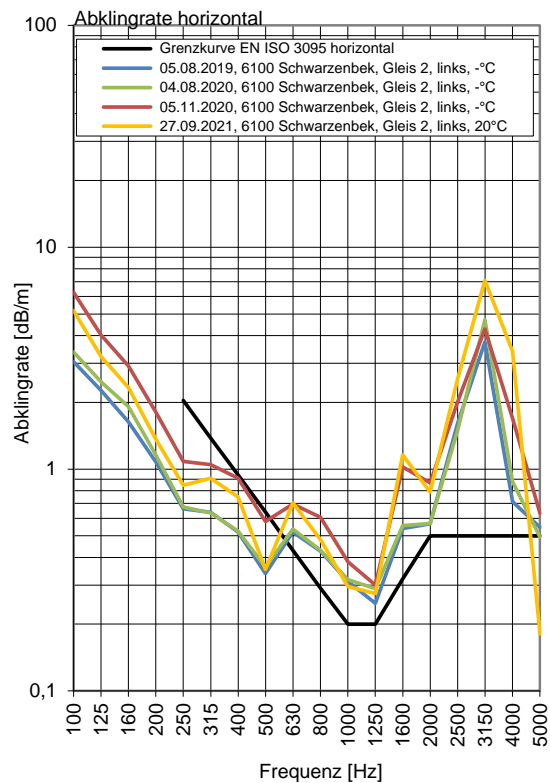
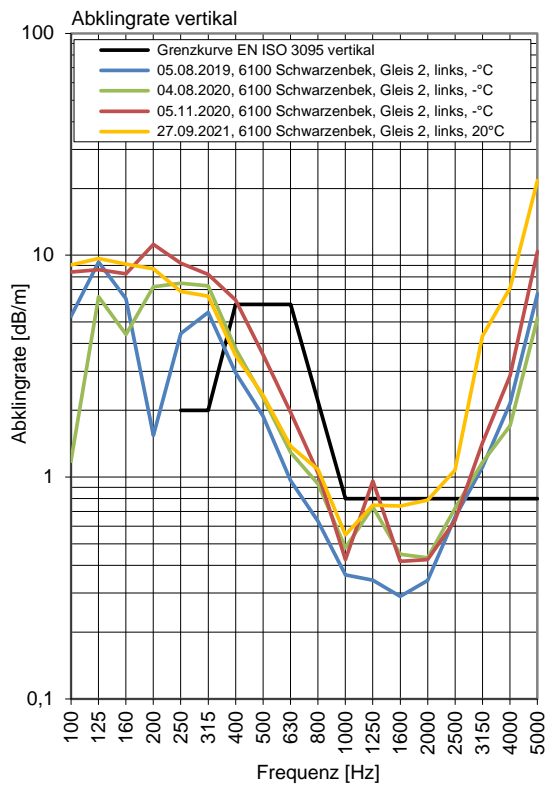
Gleis 2: Richtung Berlin

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





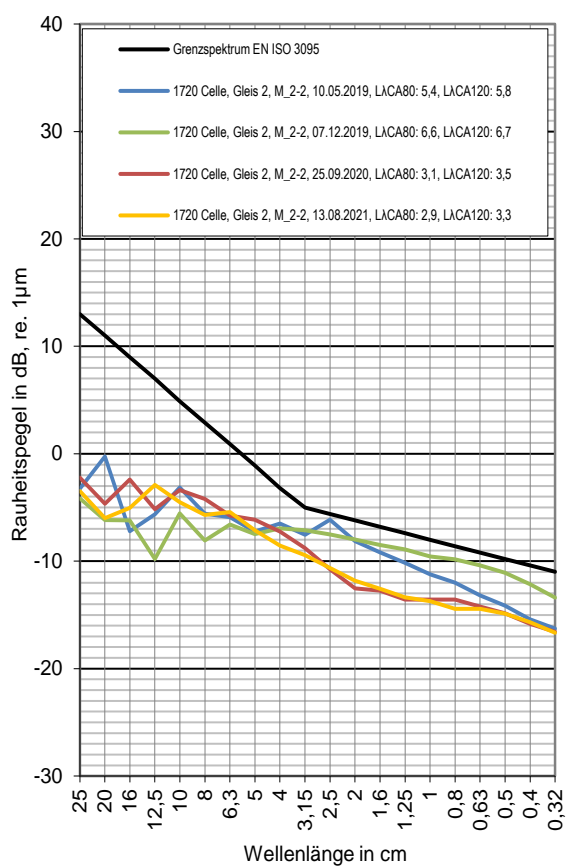
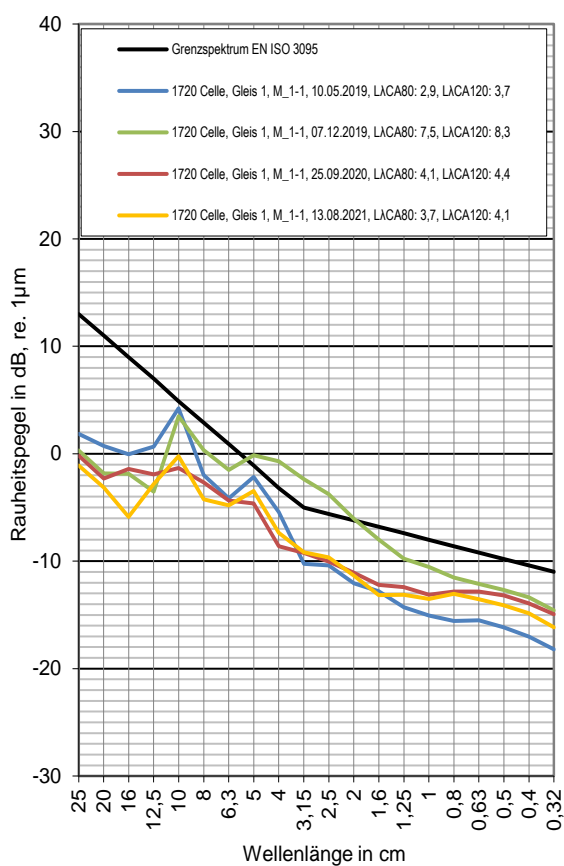
Messstelle Celle

Strecke 1720, km 39,8

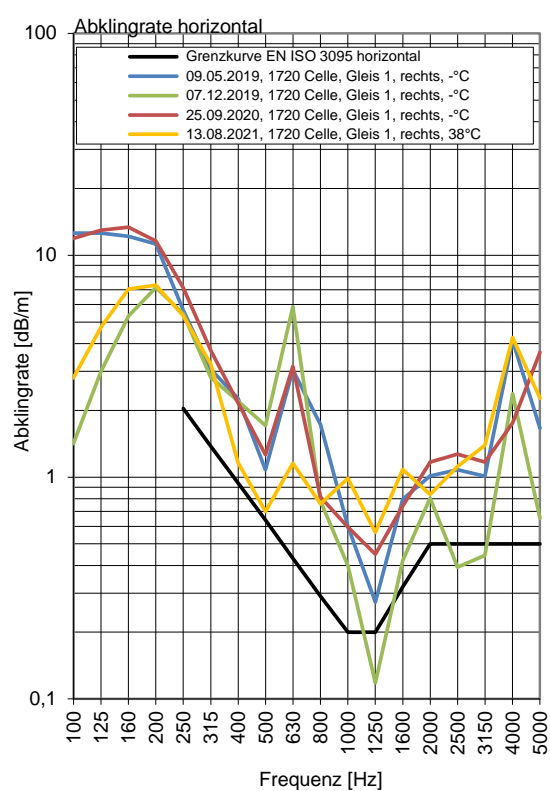
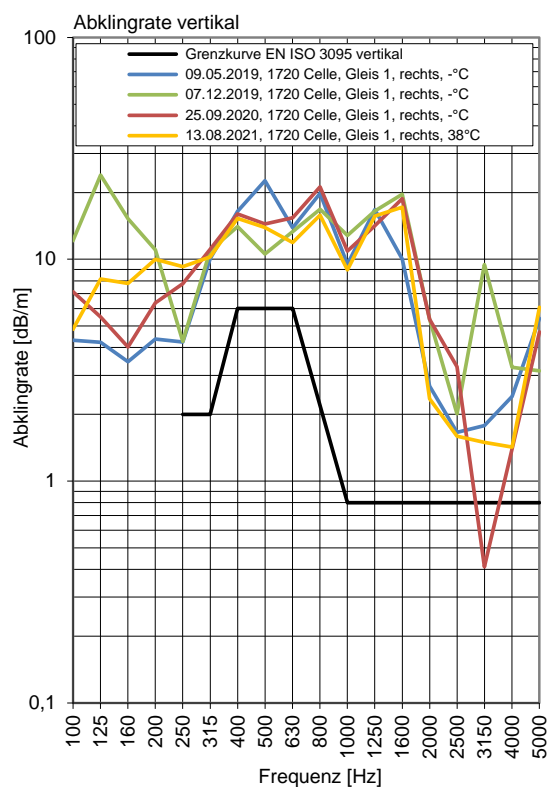
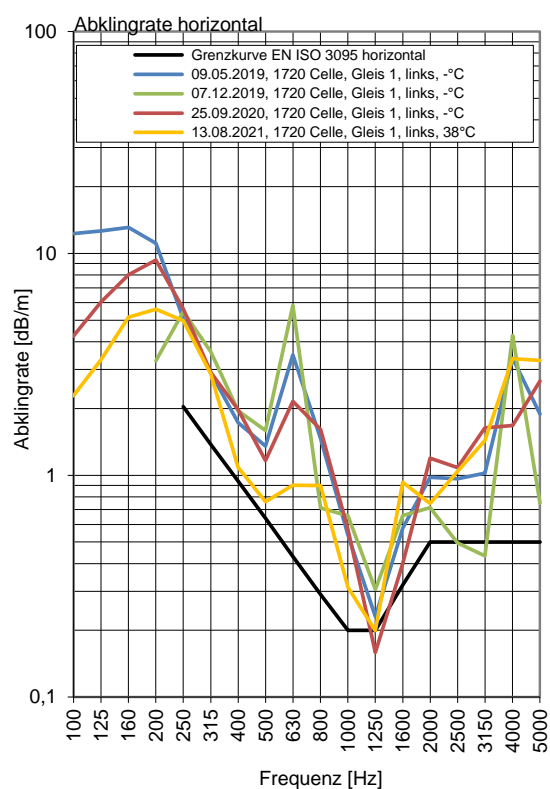
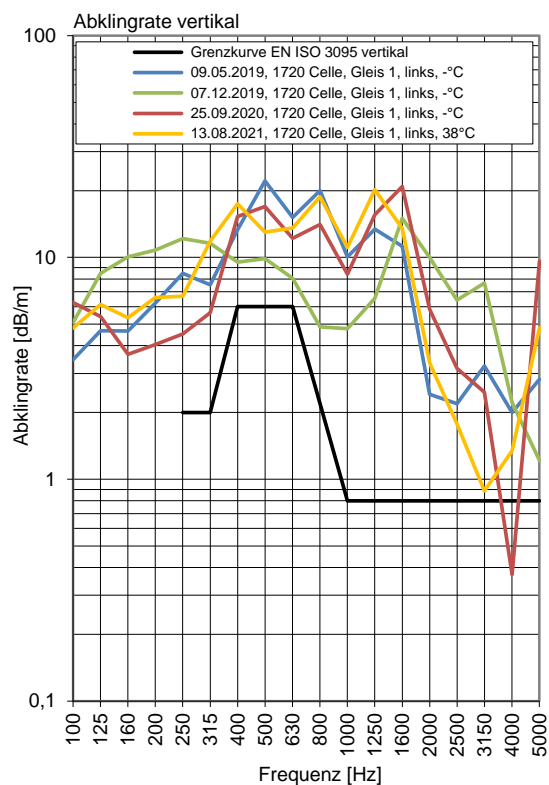
Gleis 1: Richtung Hamburg

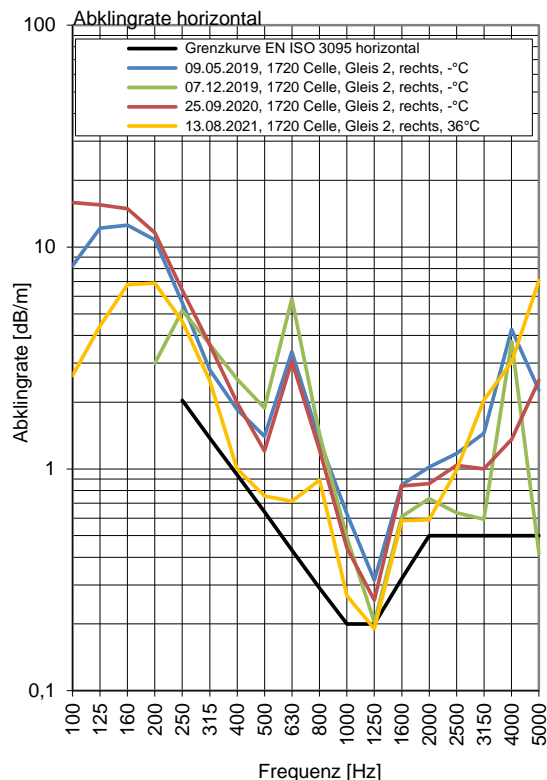
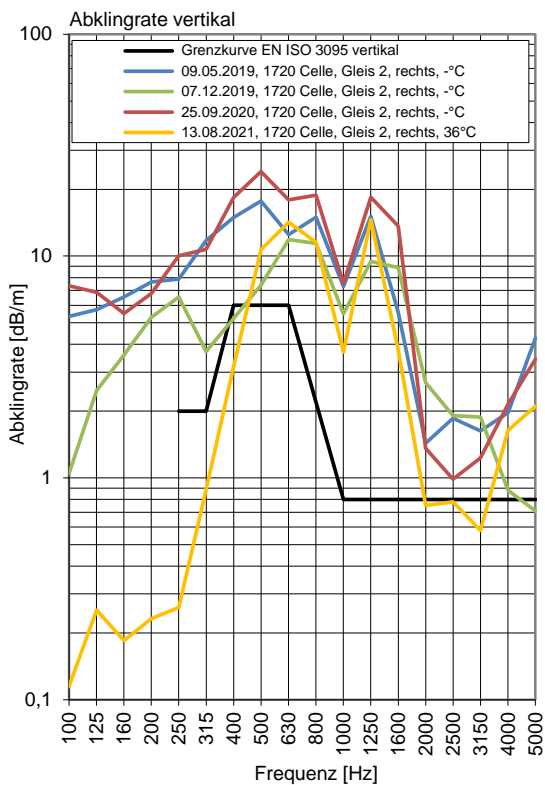
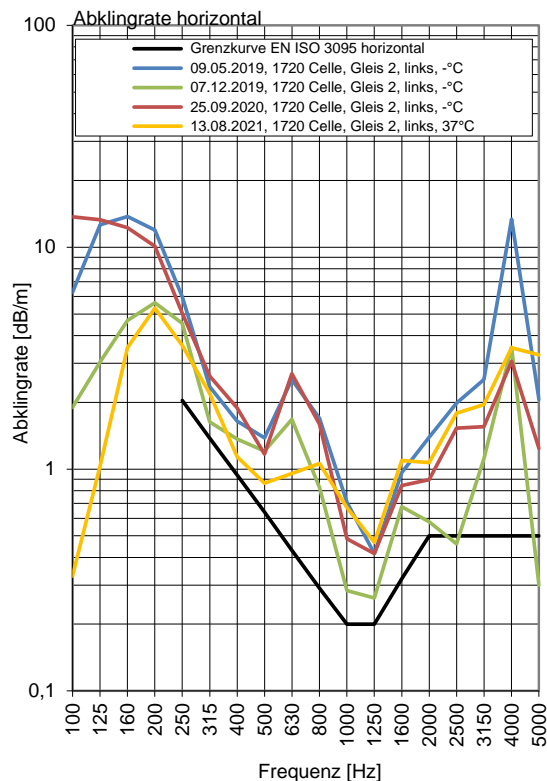
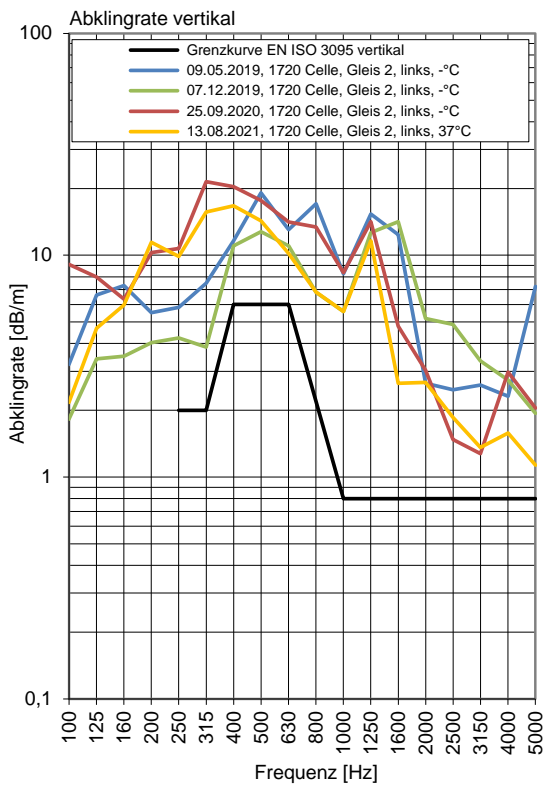
Gleis 2: Richtung Lehrte

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





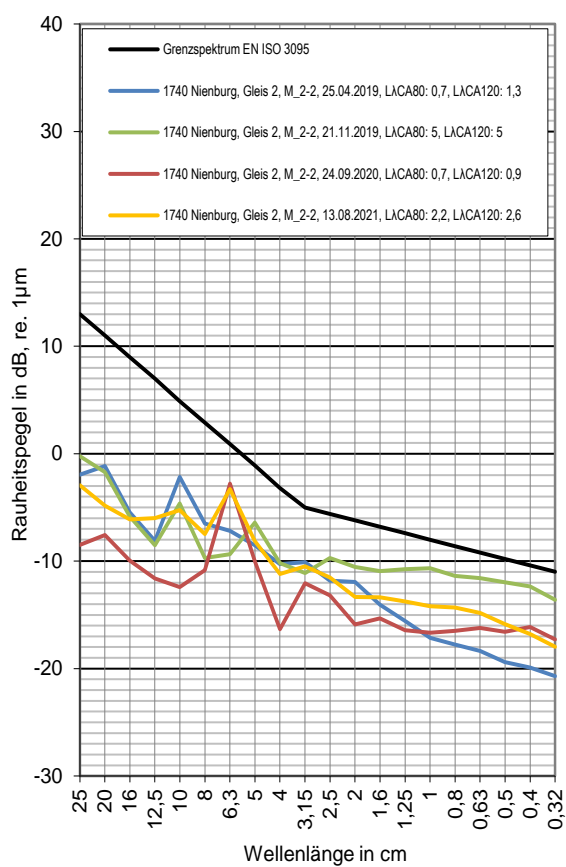
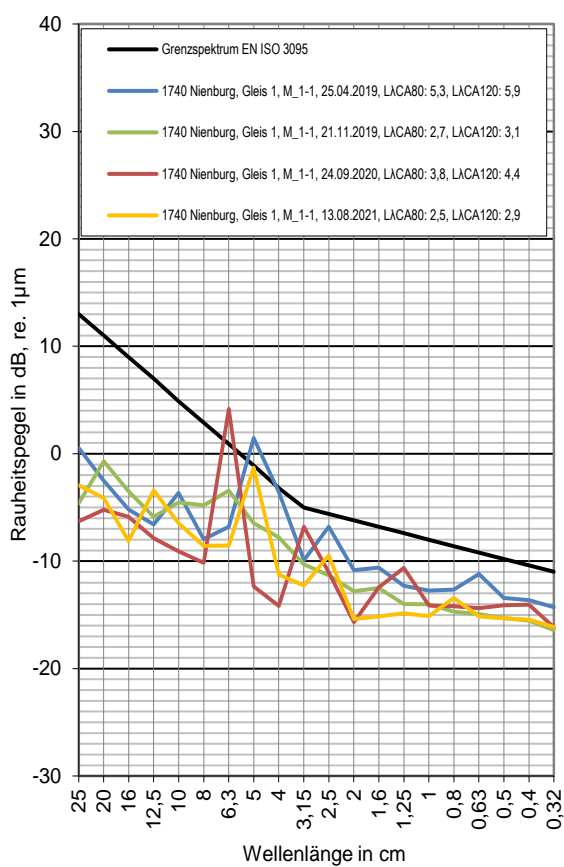
Messstelle Nienburg

Strecke 1740, km 65,1

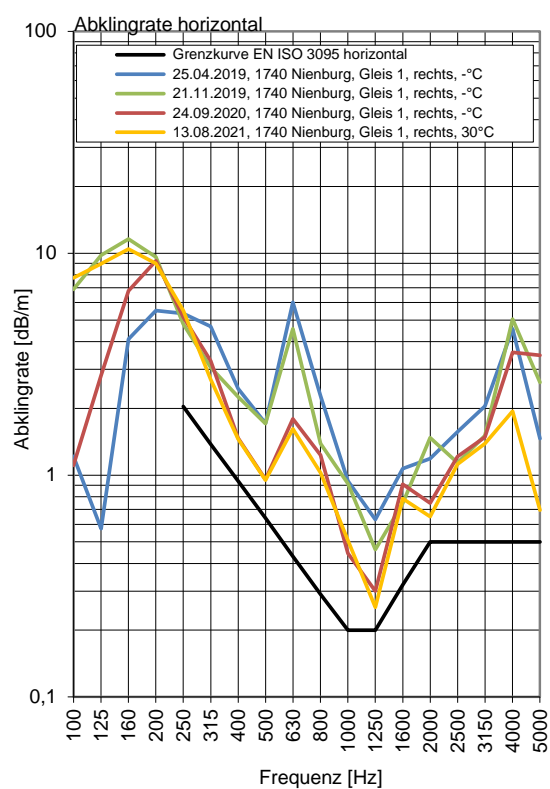
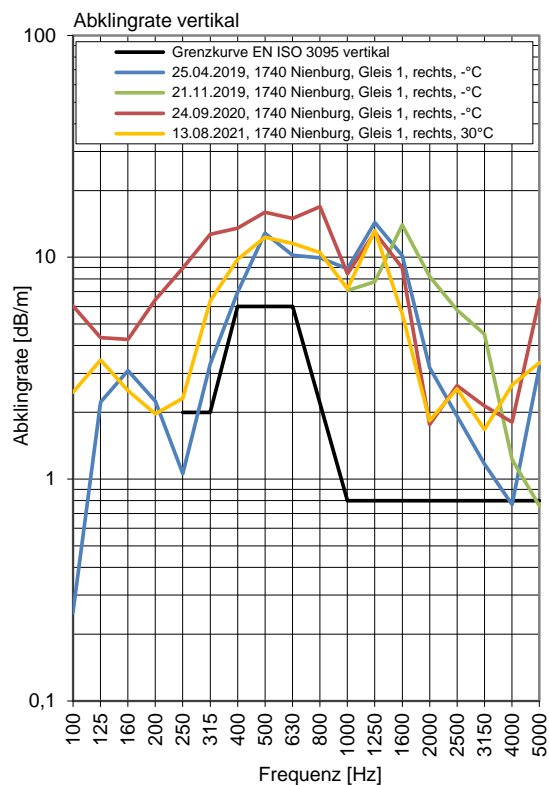
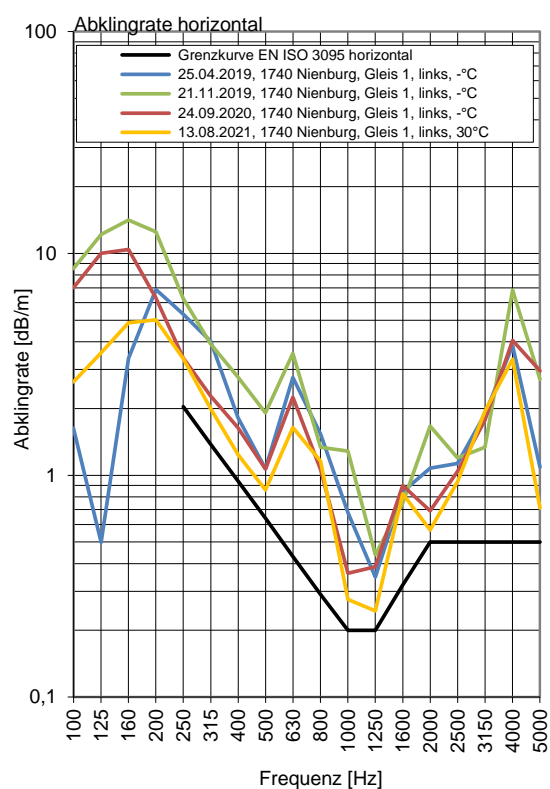
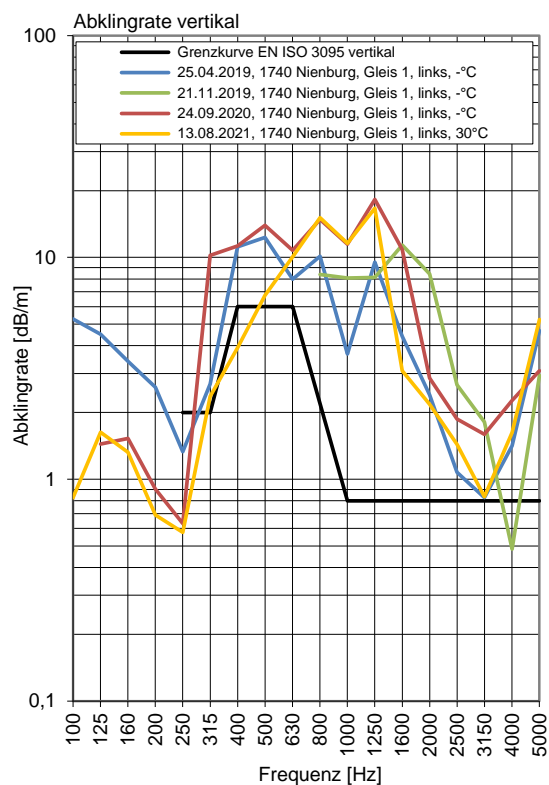
Gleis 1: Richtung Bremen

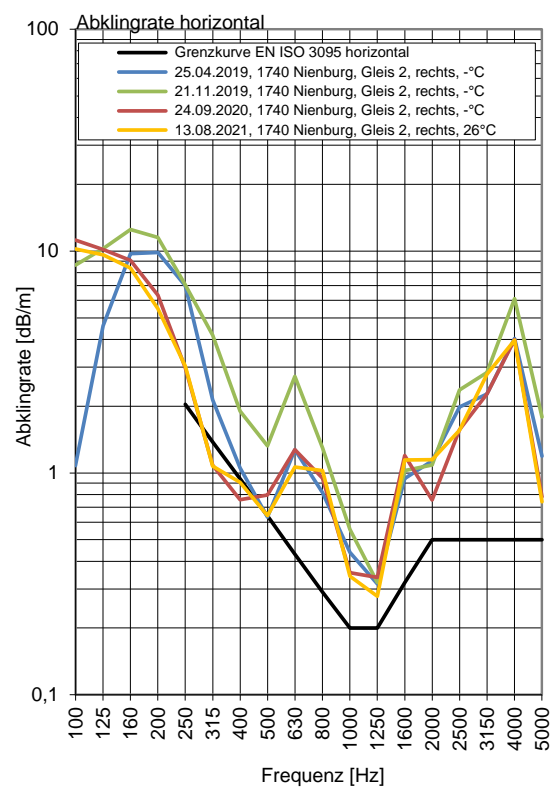
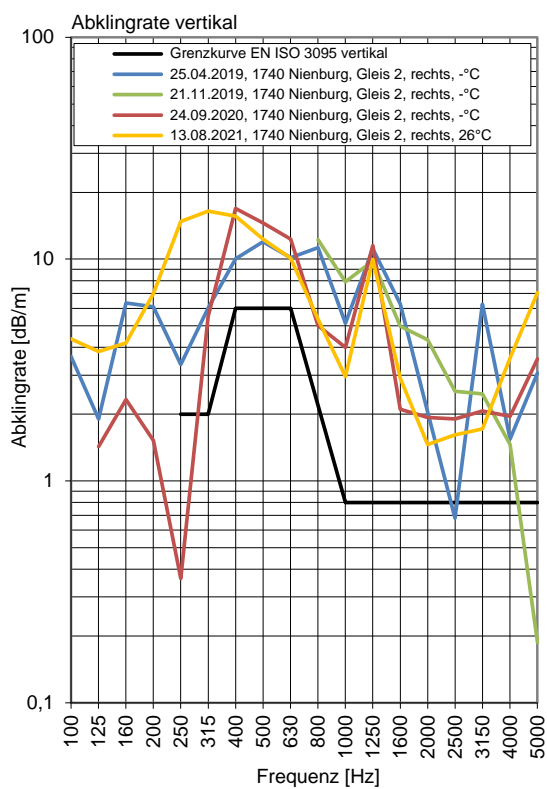
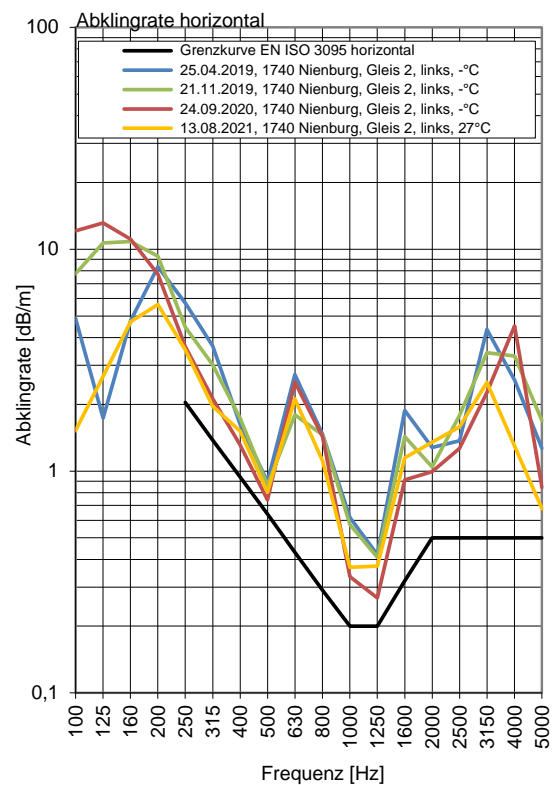
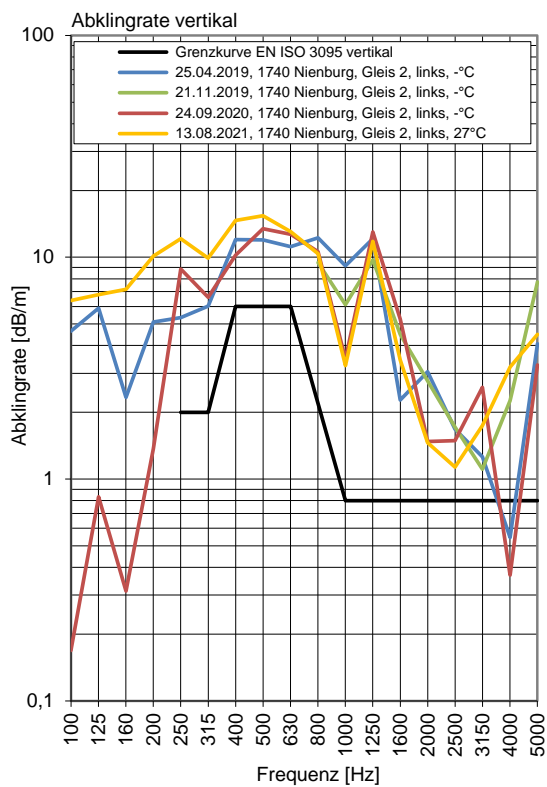
Gleis 2: Richtung Wunstorf

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





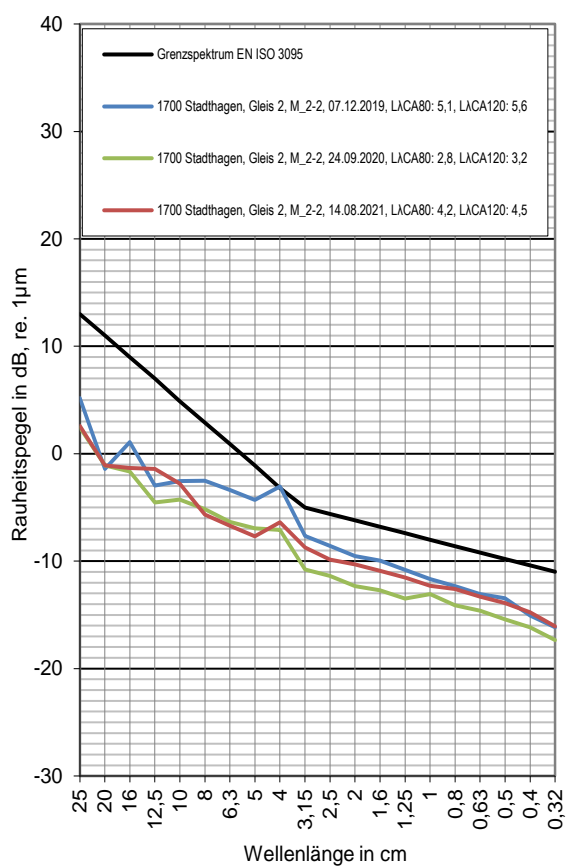
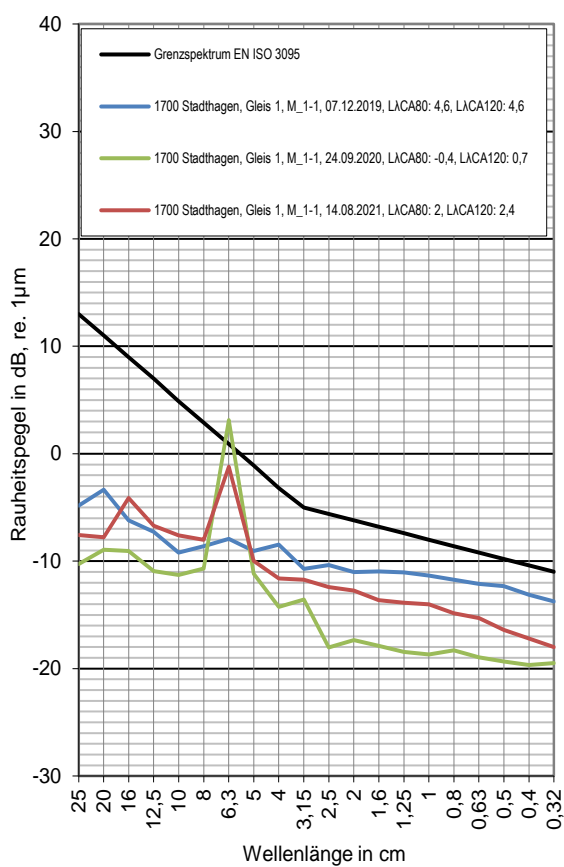
Messstelle Stadthagen

Strecke 1700, km 34,7

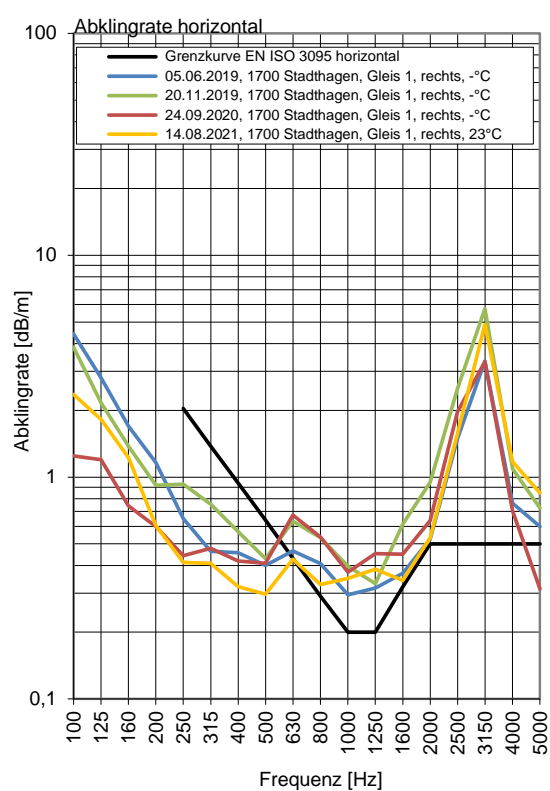
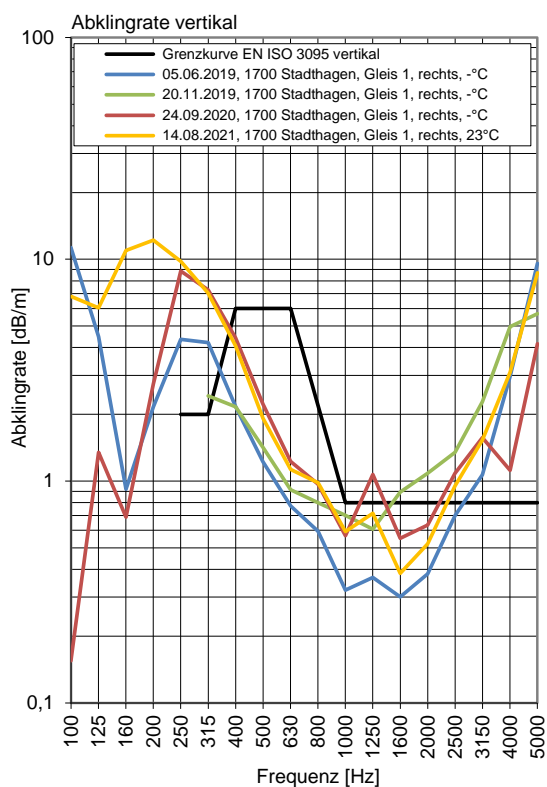
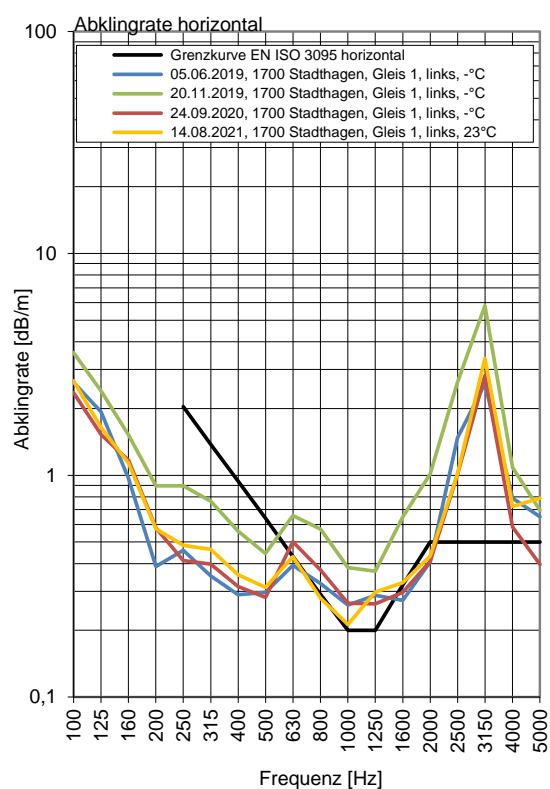
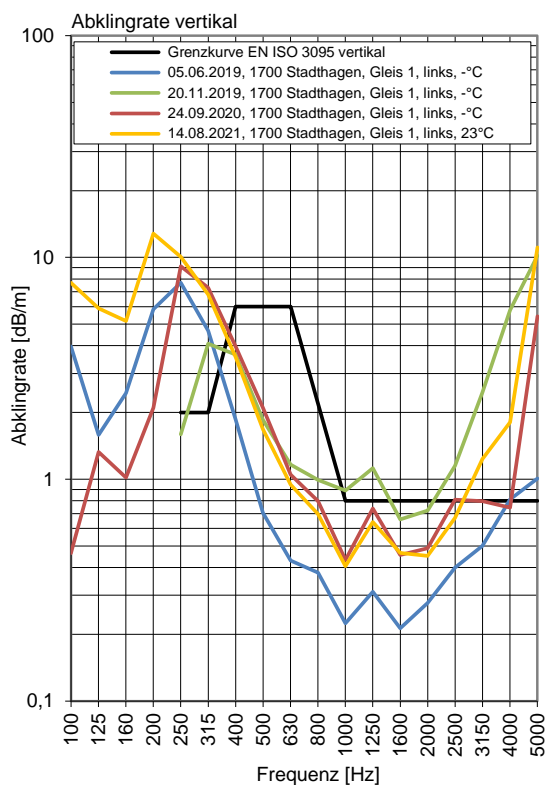
Gleis 1: Richtung Hannover

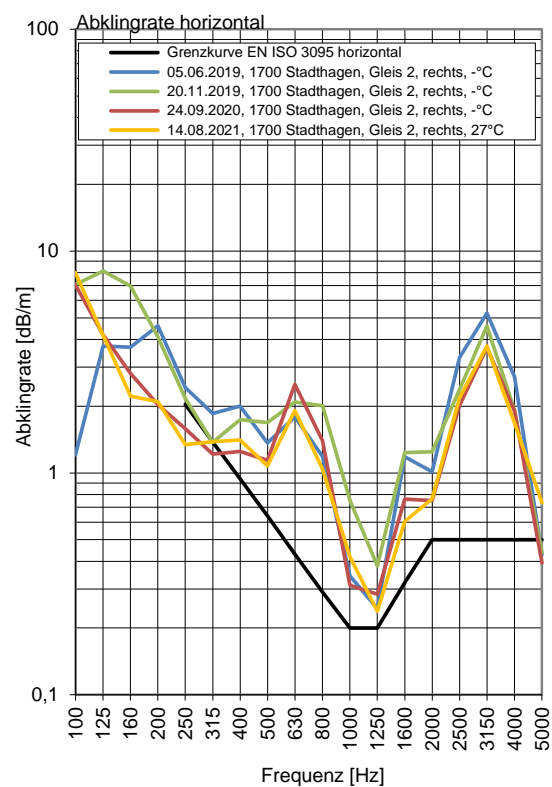
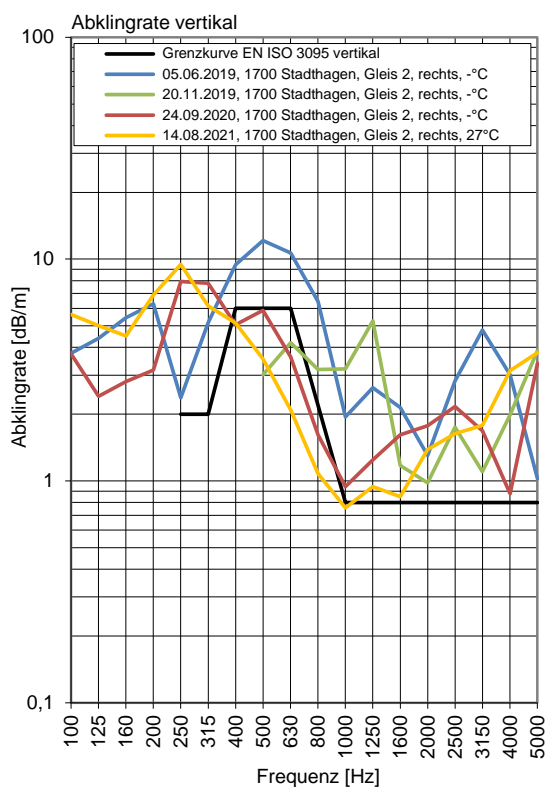
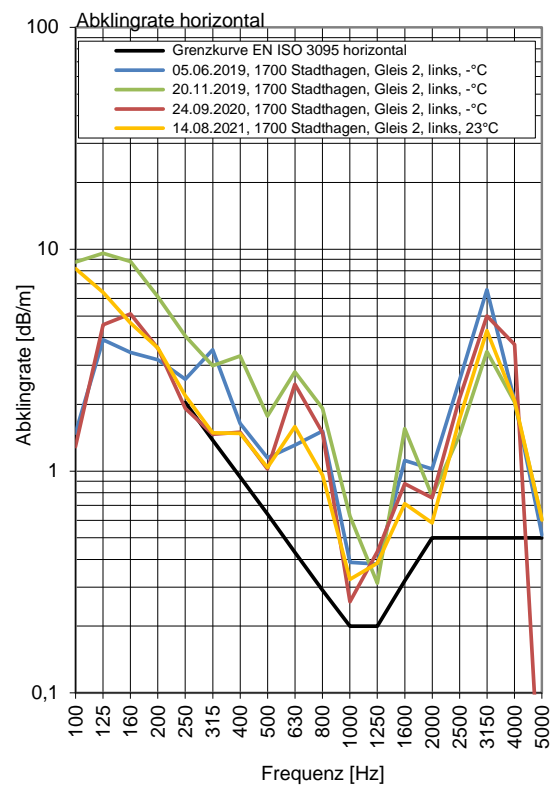
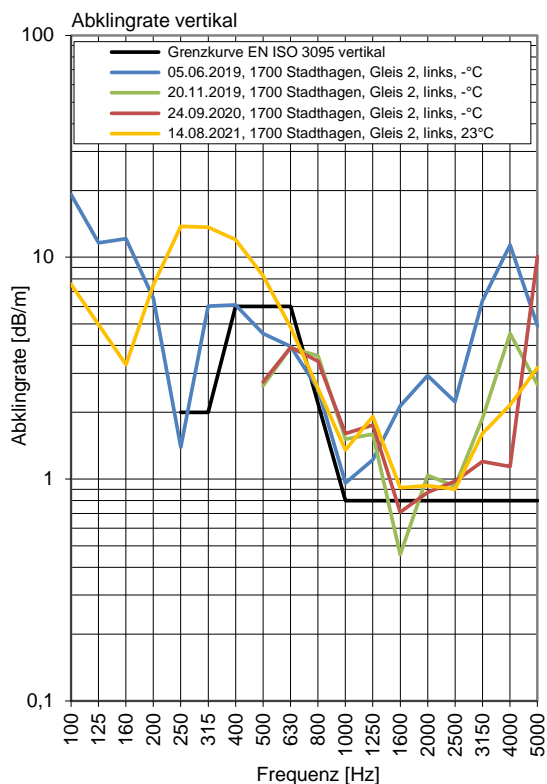
Gleis 2: Richtung Minden

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





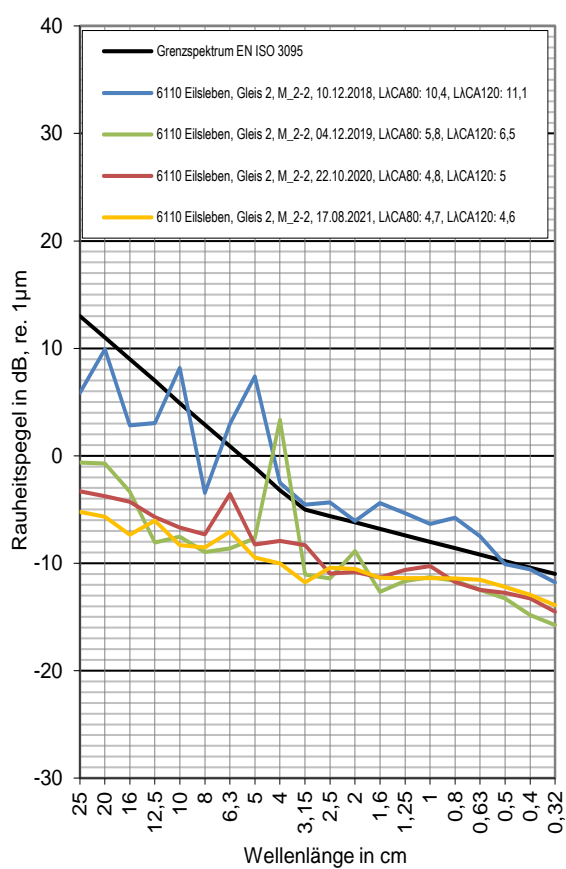
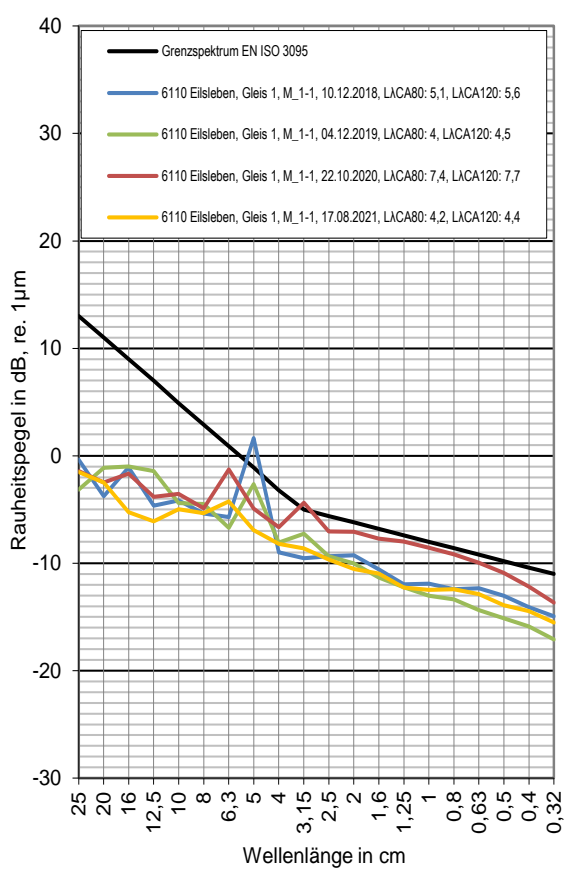
Messstelle Eilsleben

Strecke 6110, km 159,9

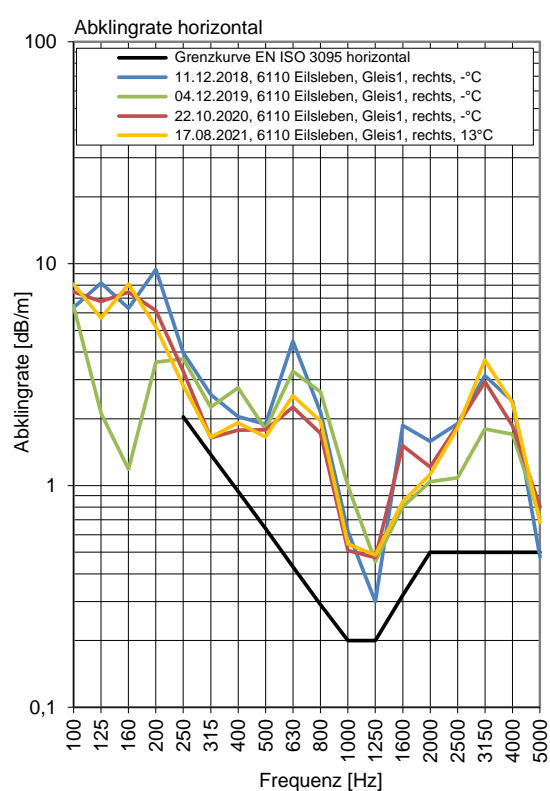
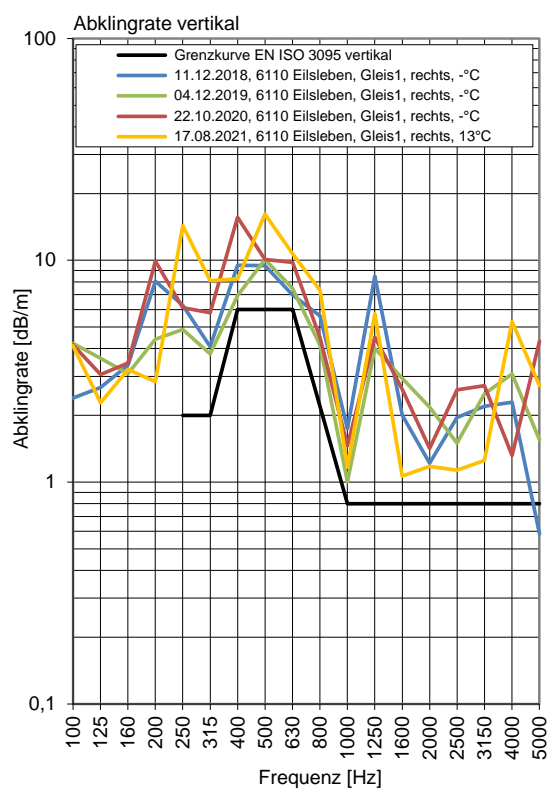
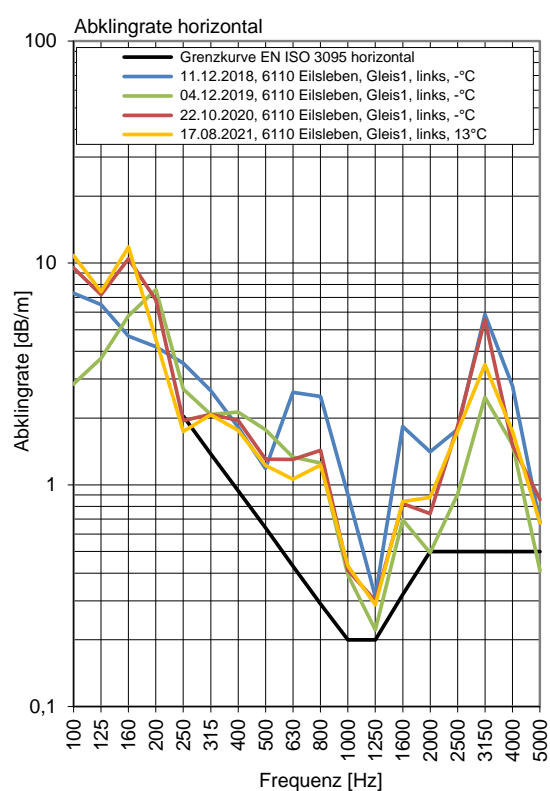
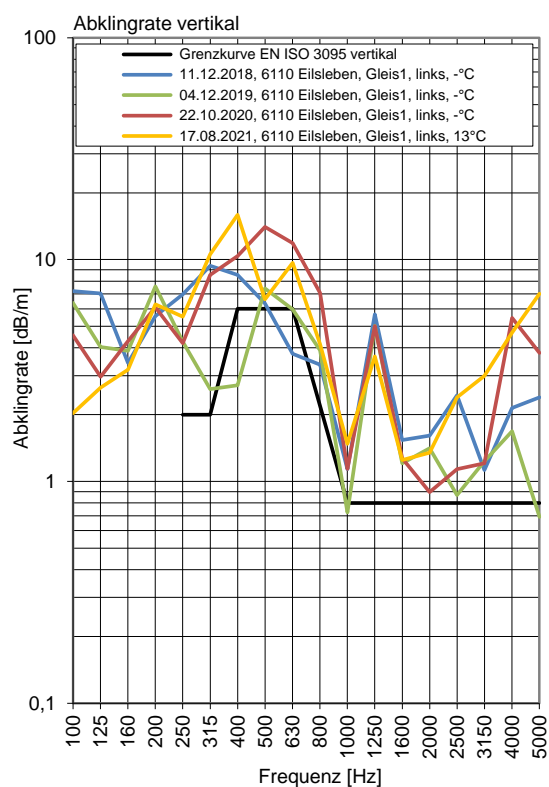
Gleis 1: Richtung Braunschweig

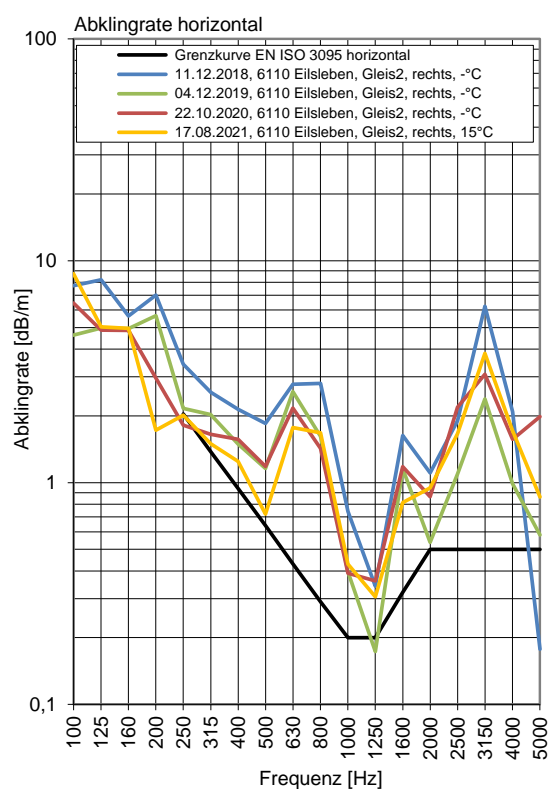
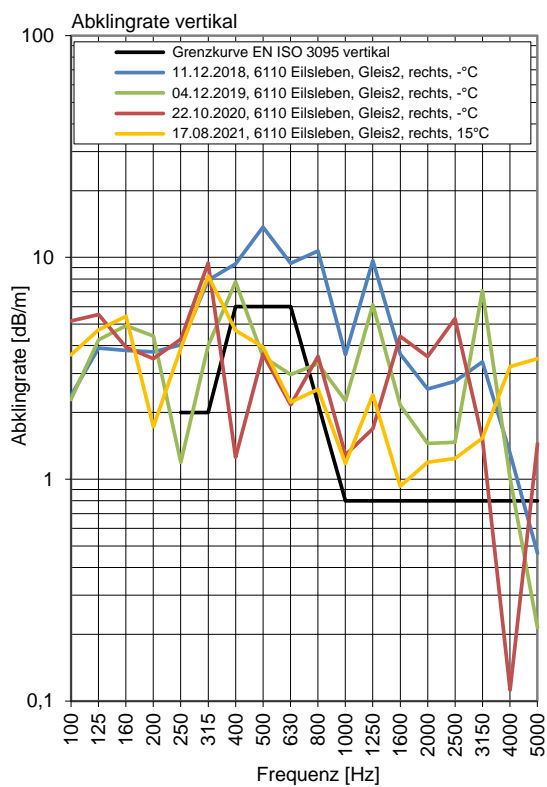
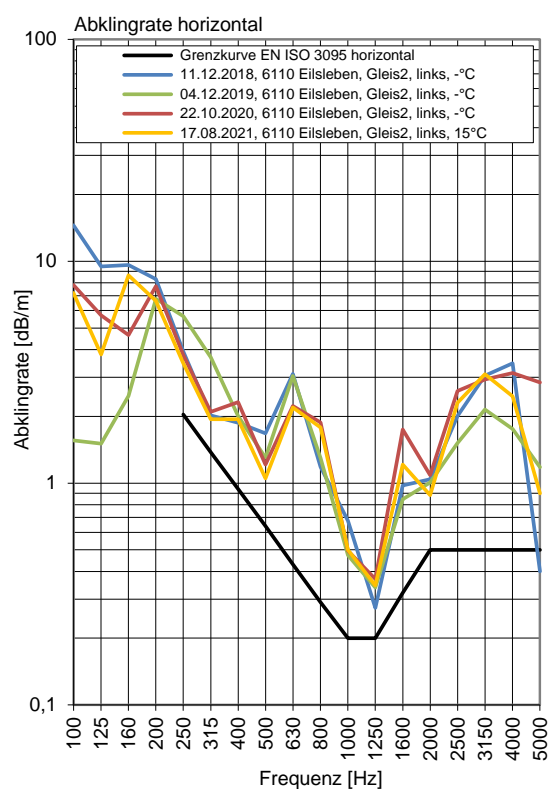
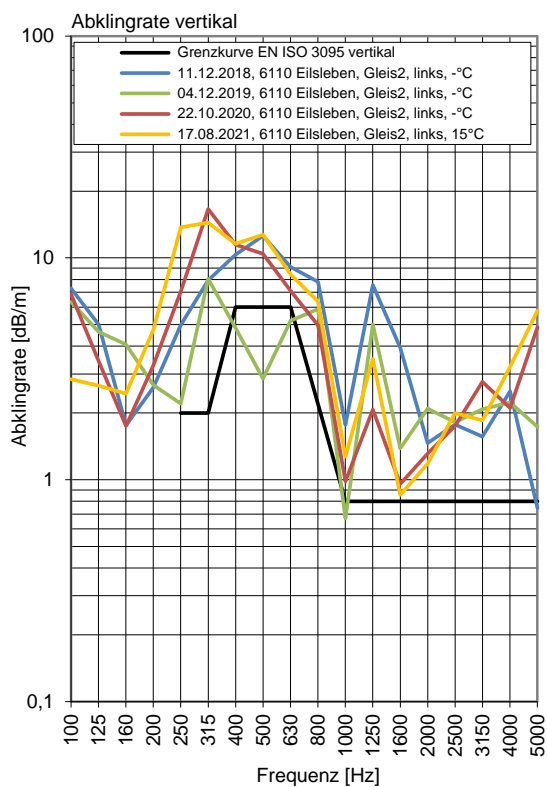
Gleis 2: Richtung Magdeburg

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





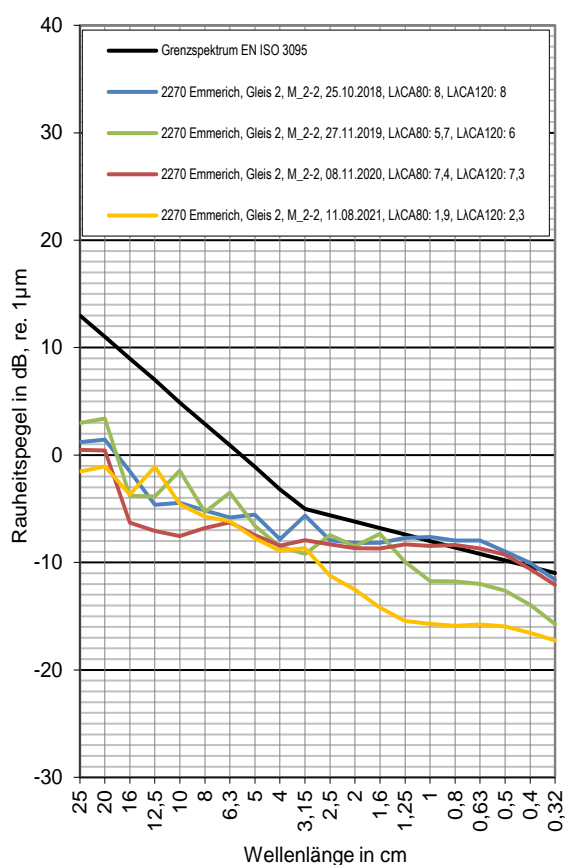
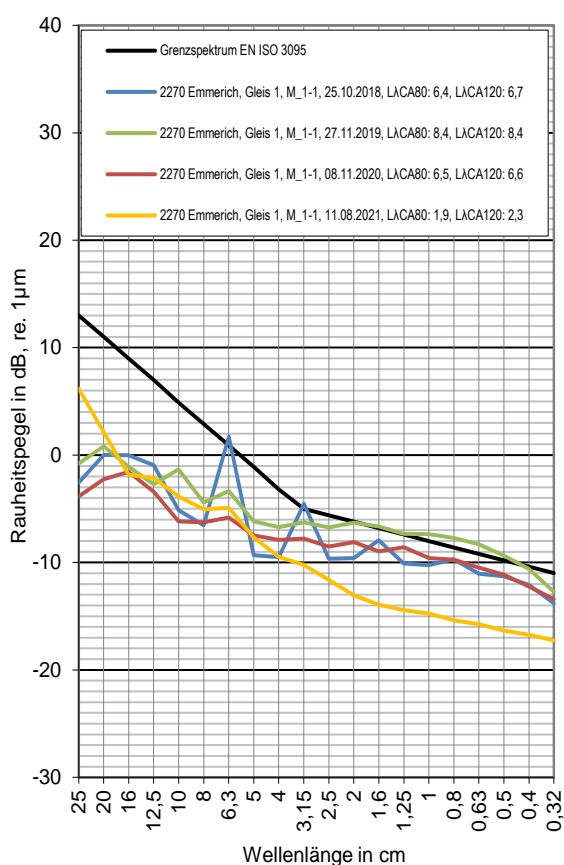
Messstelle Emmerich

Strecke 2270, km 45,9

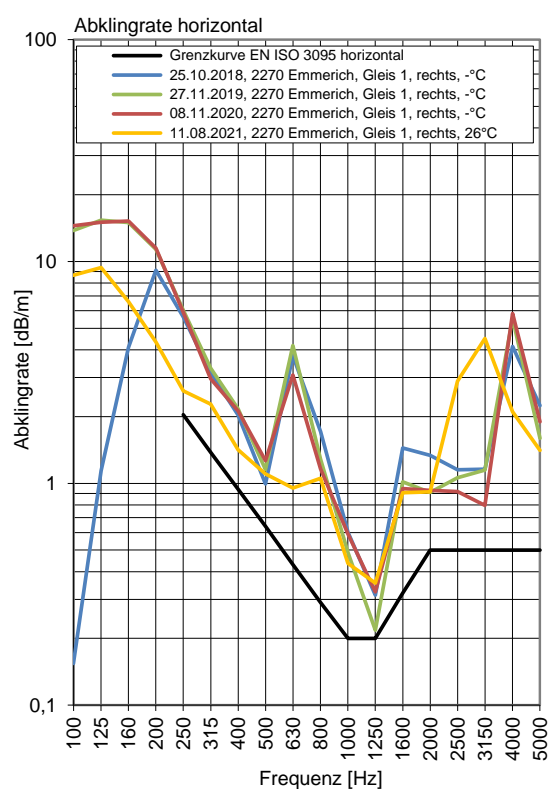
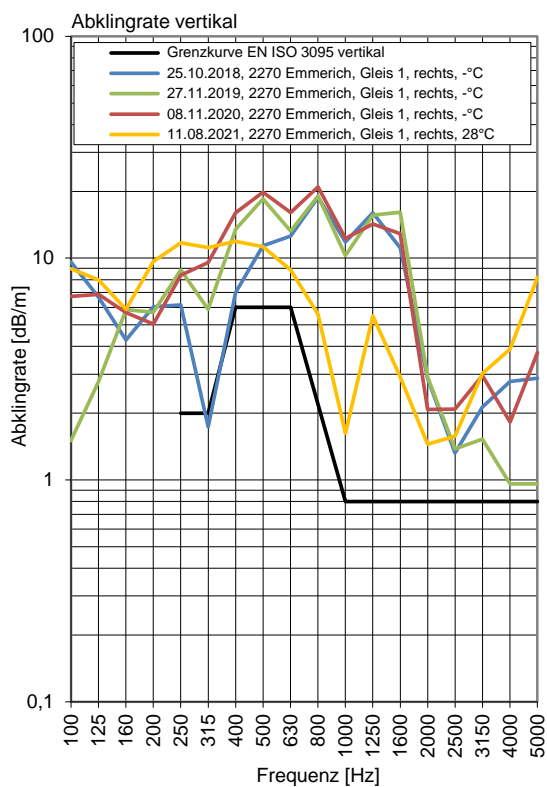
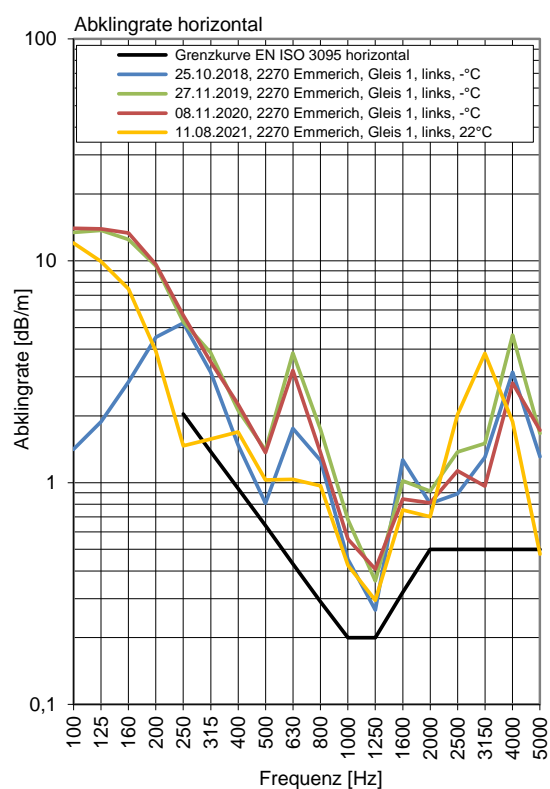
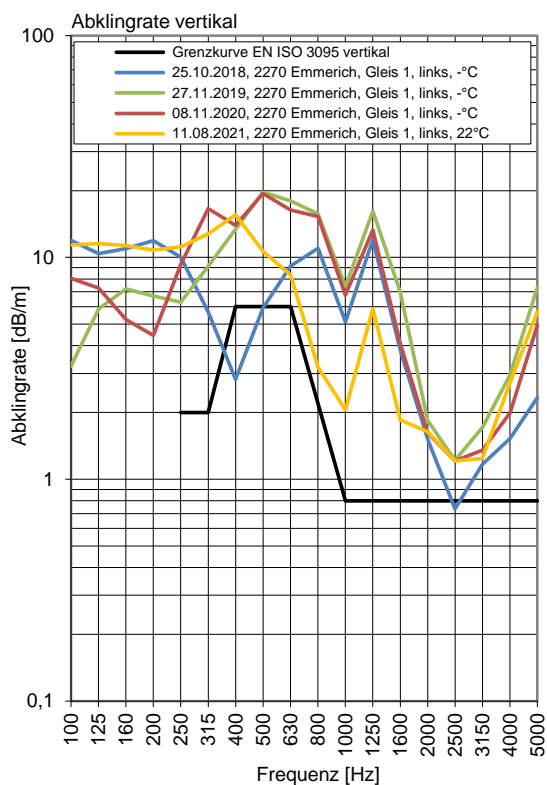
Gleis 1: Richtung Oberhausen

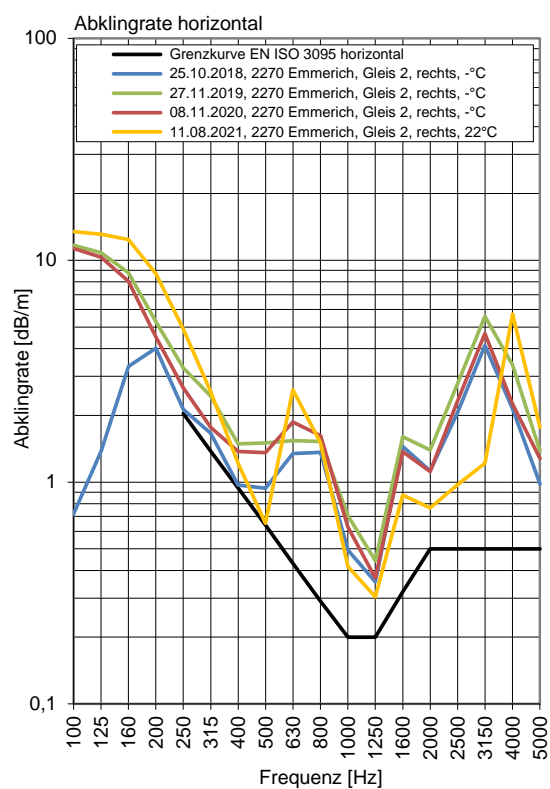
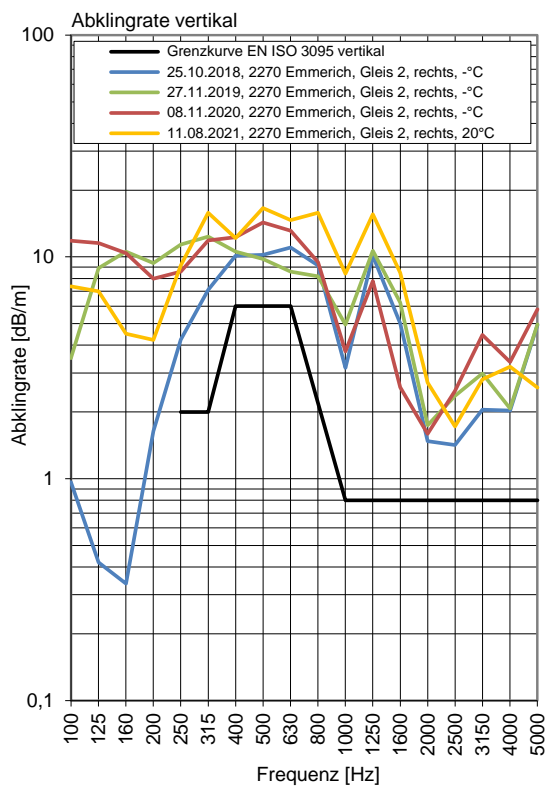
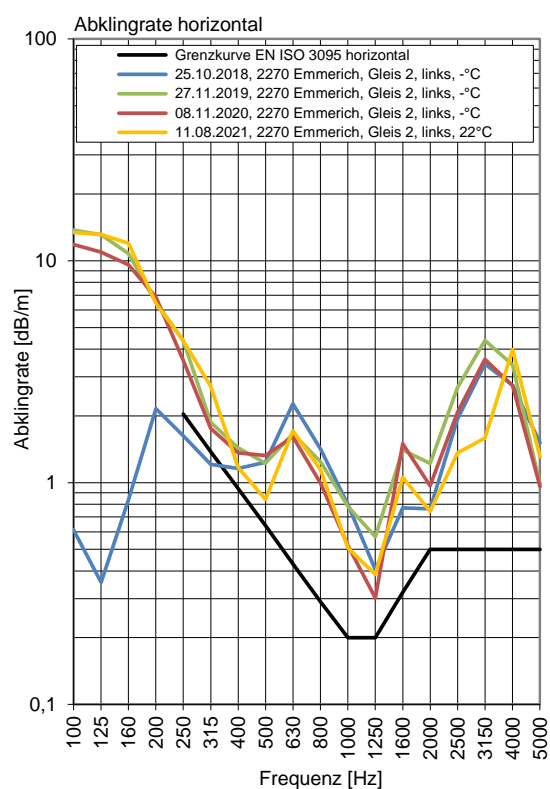
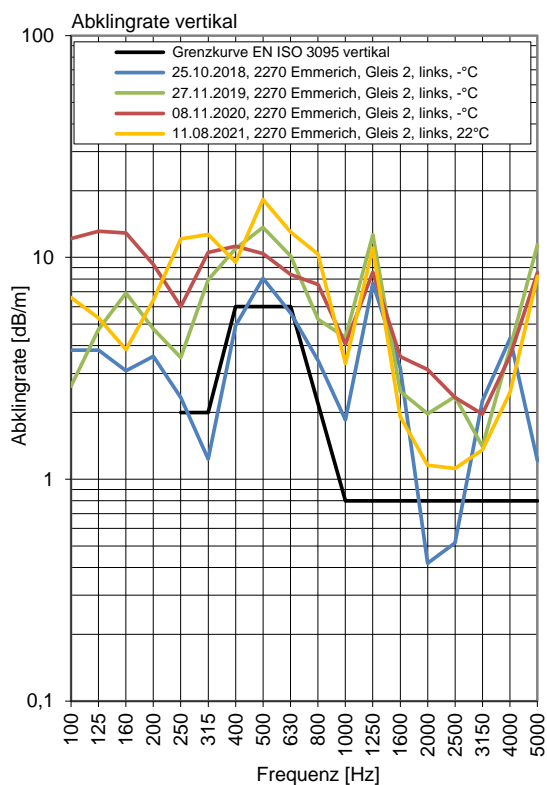
Gleis 2: Richtung Emmerich

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





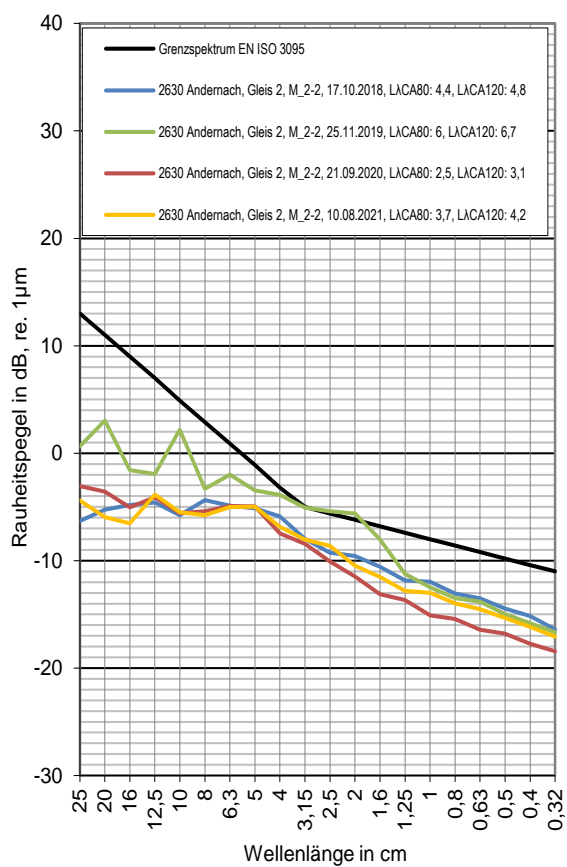
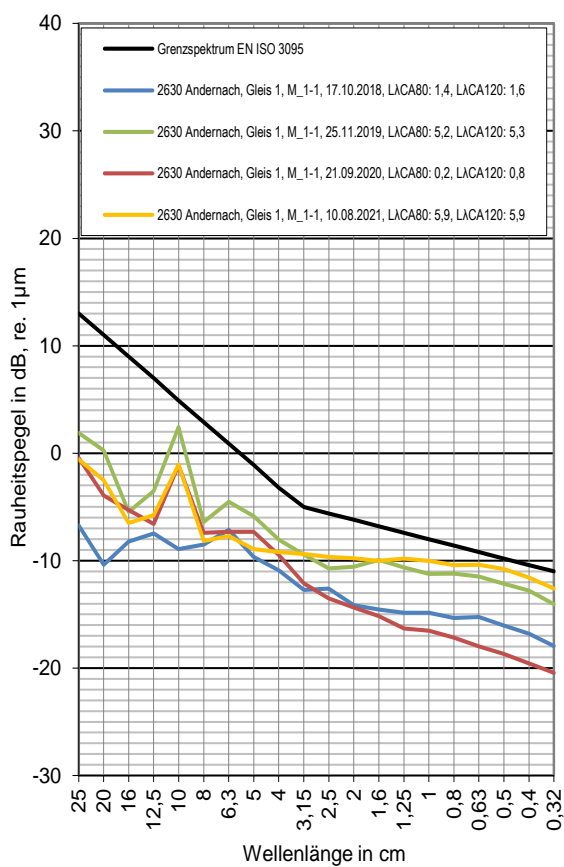
Messstelle Andernach

Strecke 2630, km 68,8

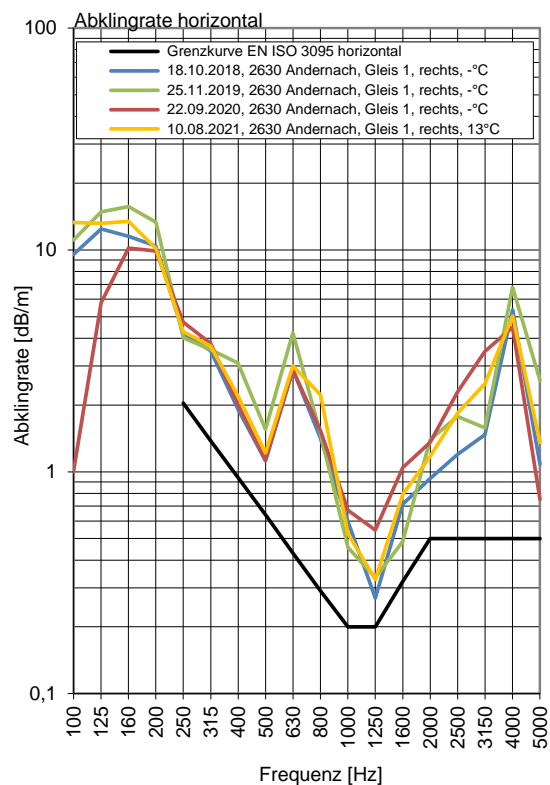
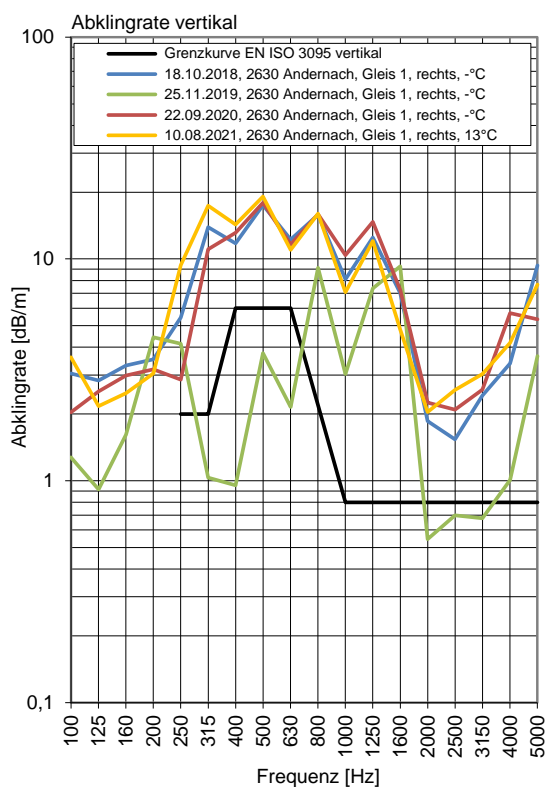
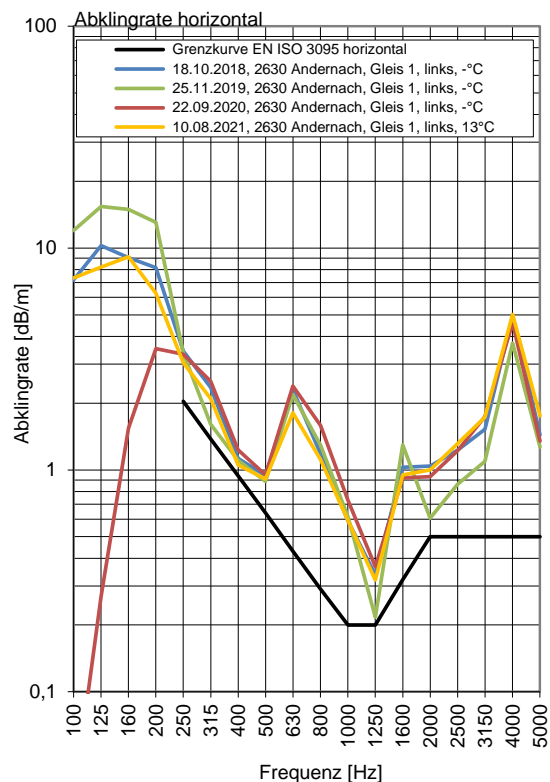
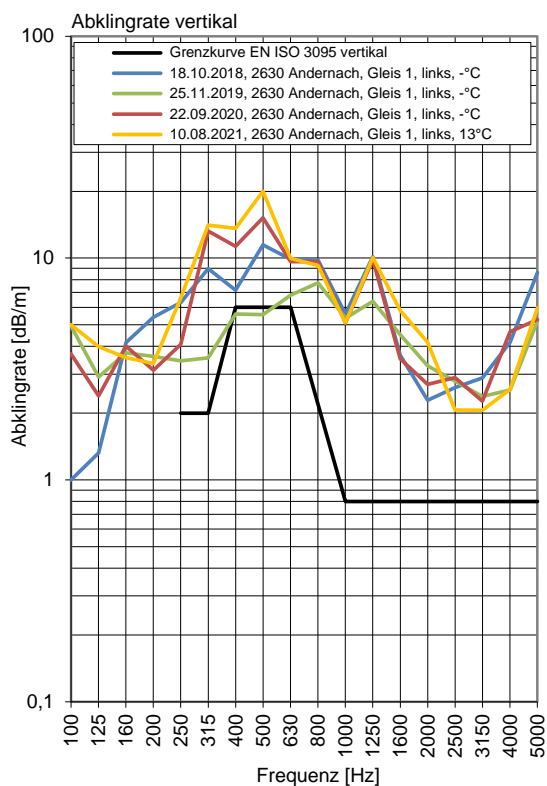
Gleis 1: Richtung Köln

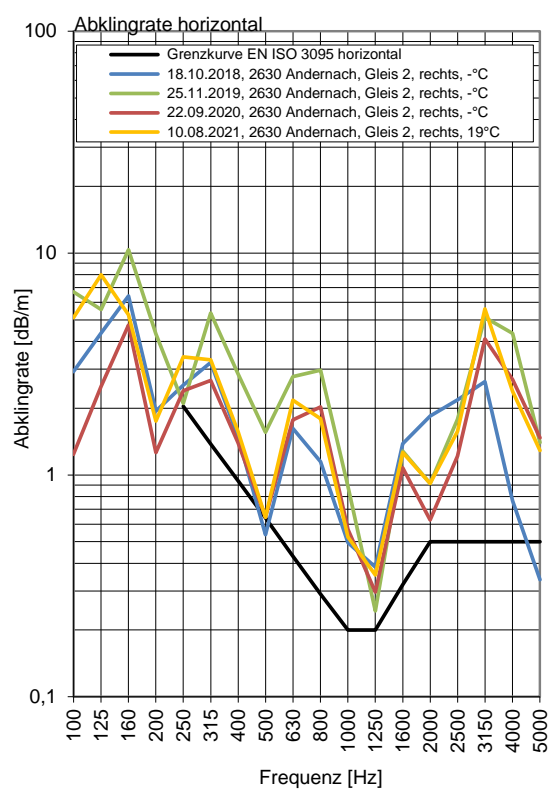
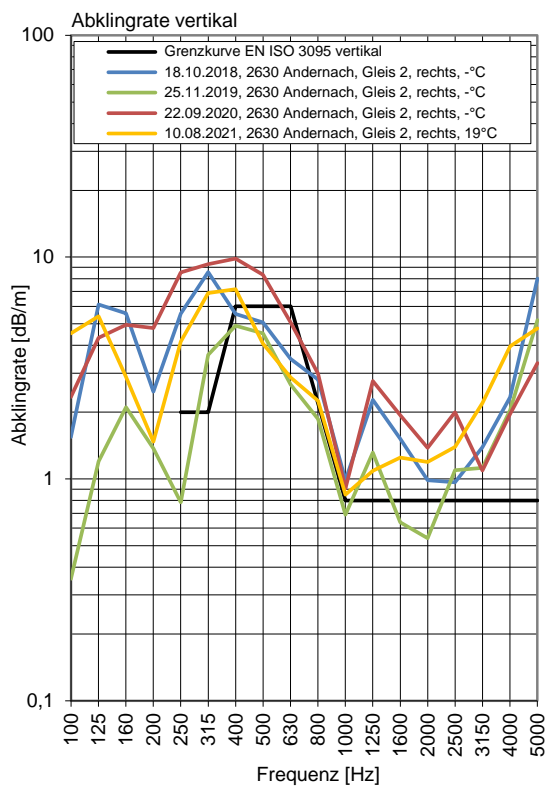
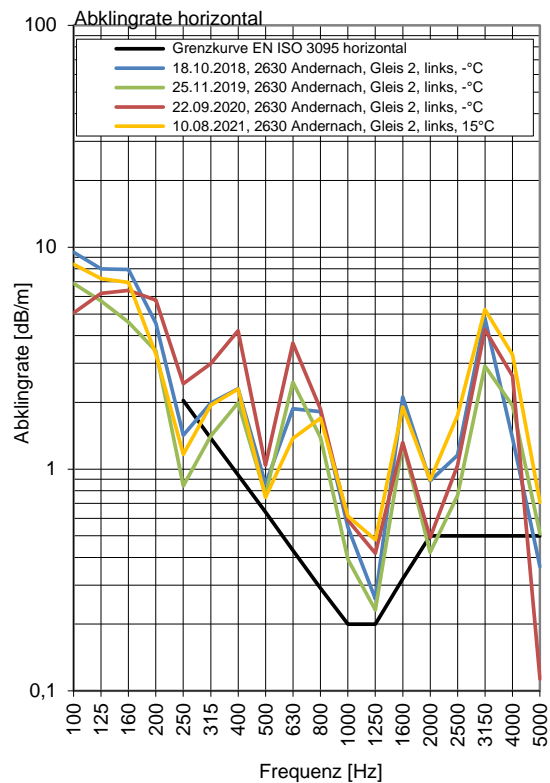
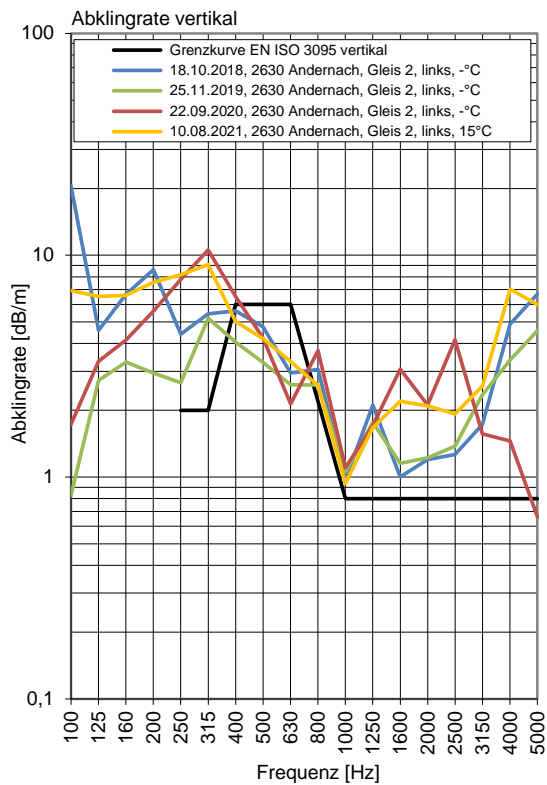
Gleis 2: Richtung Bingen

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





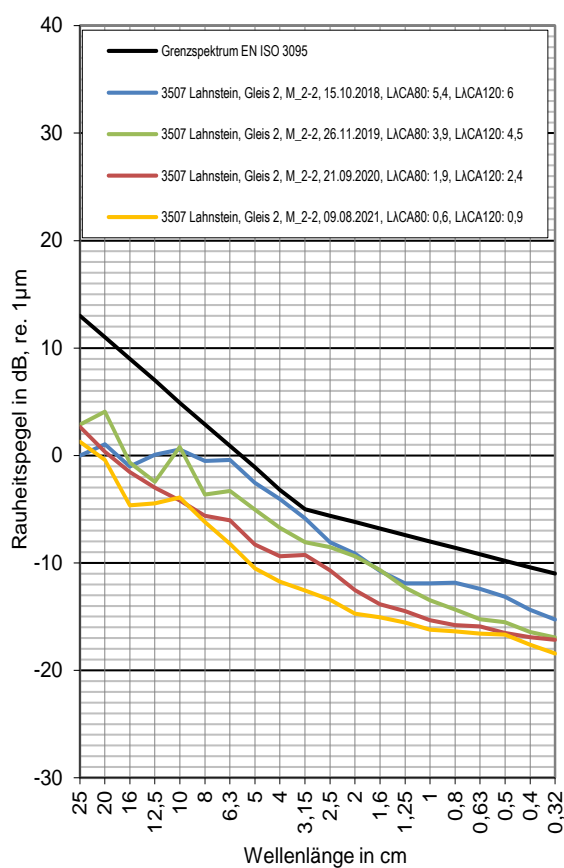
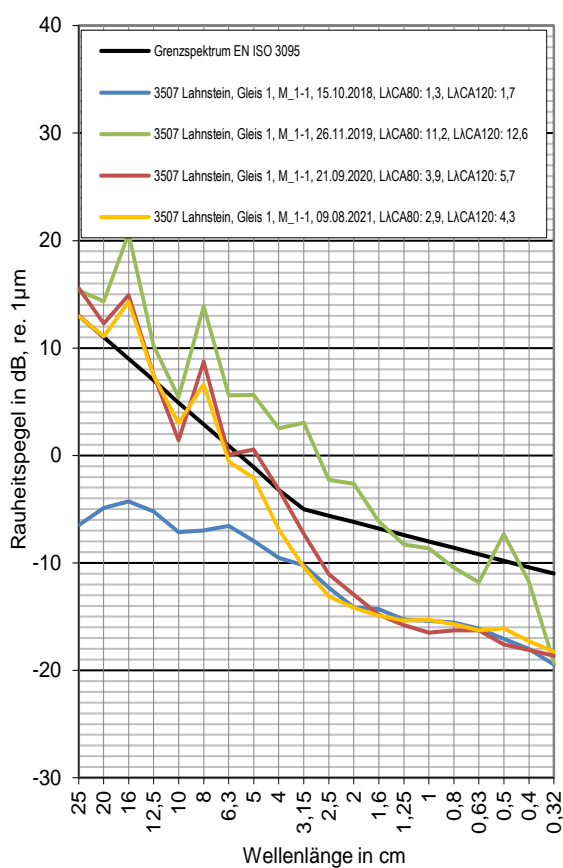
Messstelle Lahnstein

Strecke 3507, km 99,0

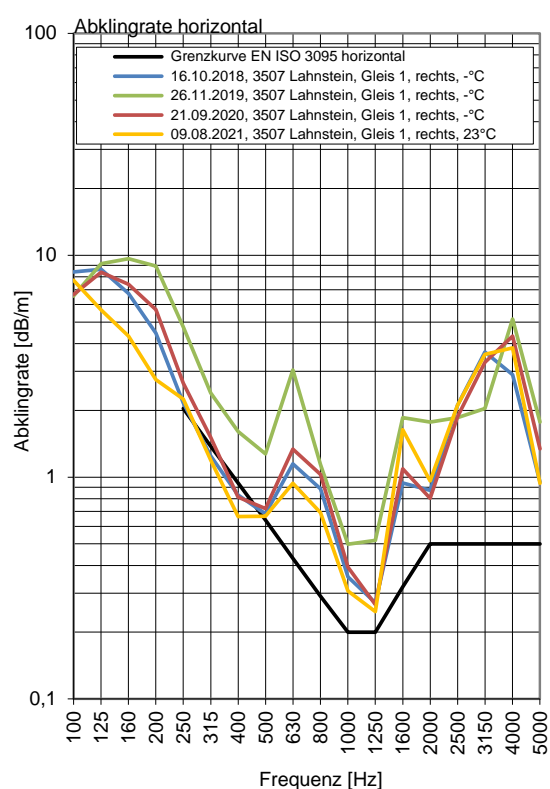
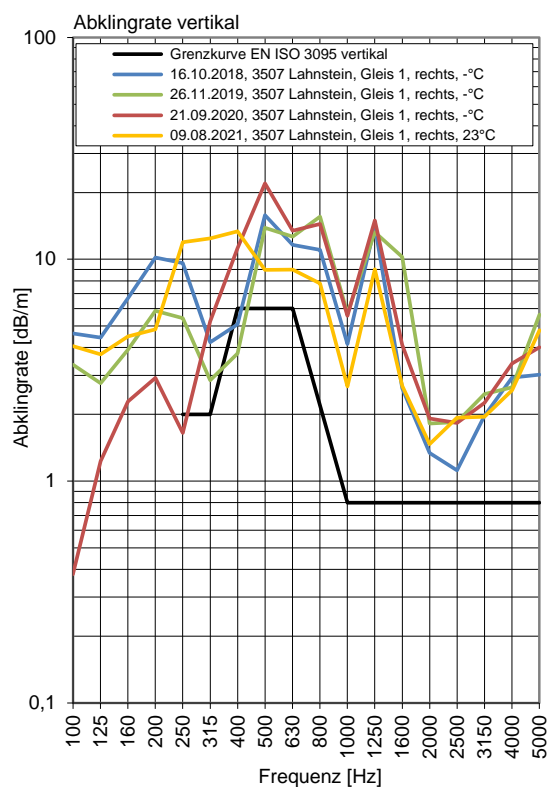
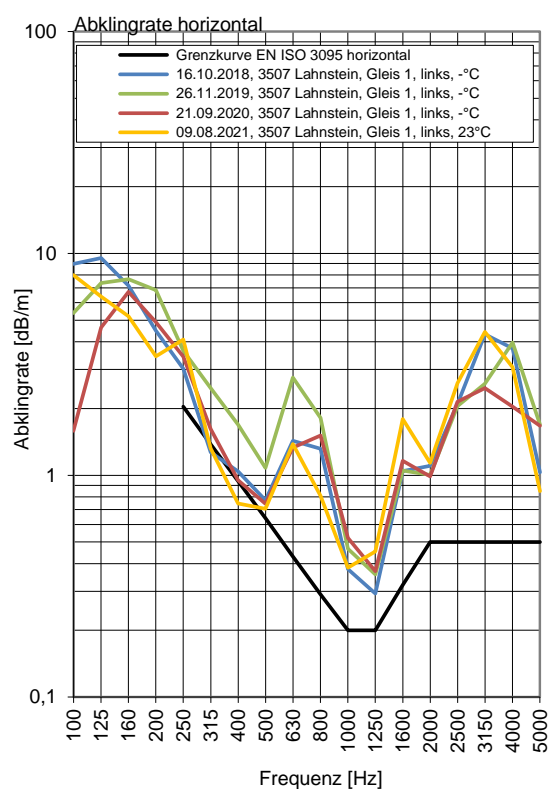
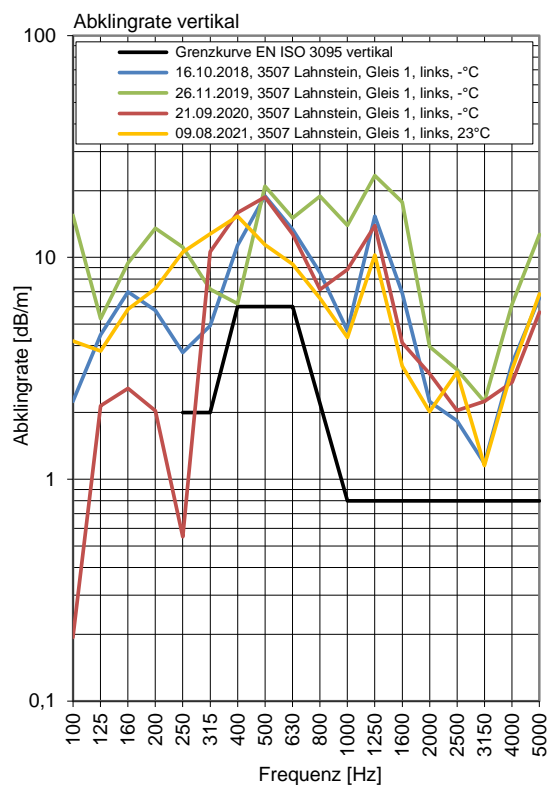
Gleis 1: Richtung Koblenz

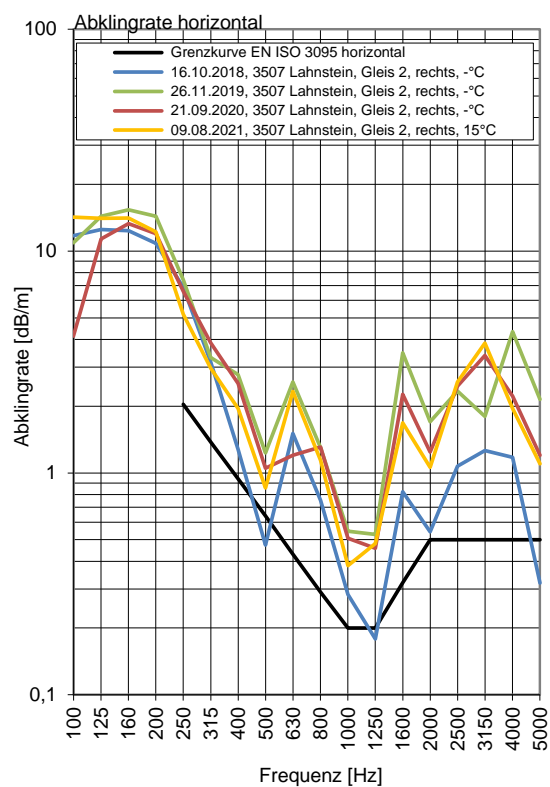
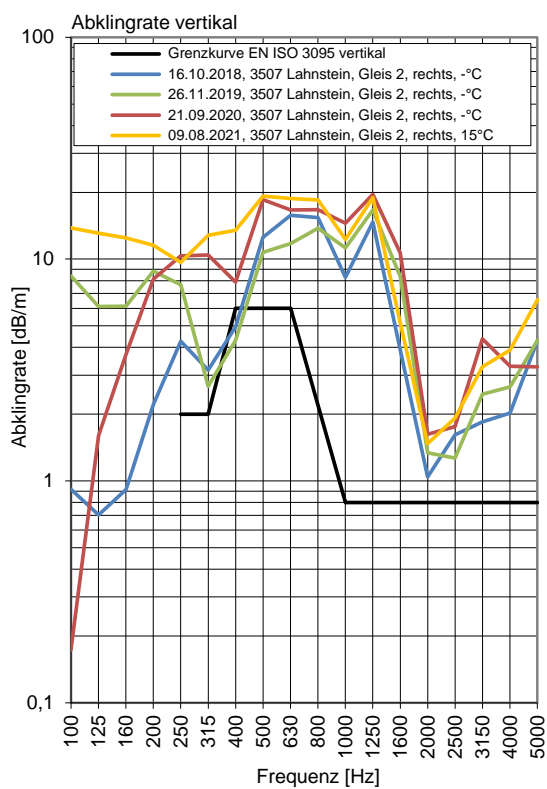
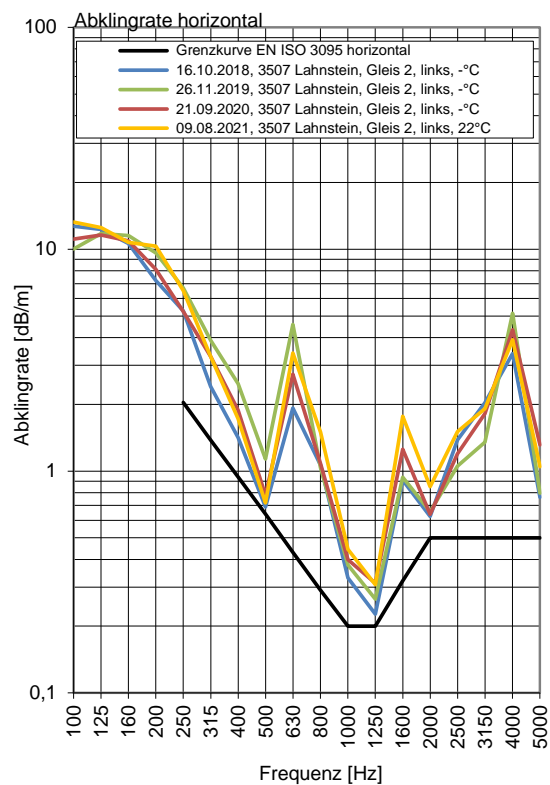
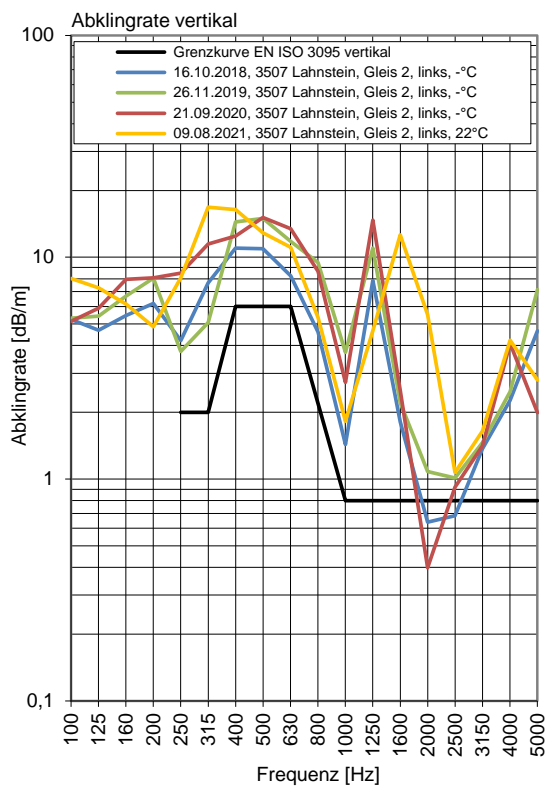
Gleis 2: Richtung Wiesbaden

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





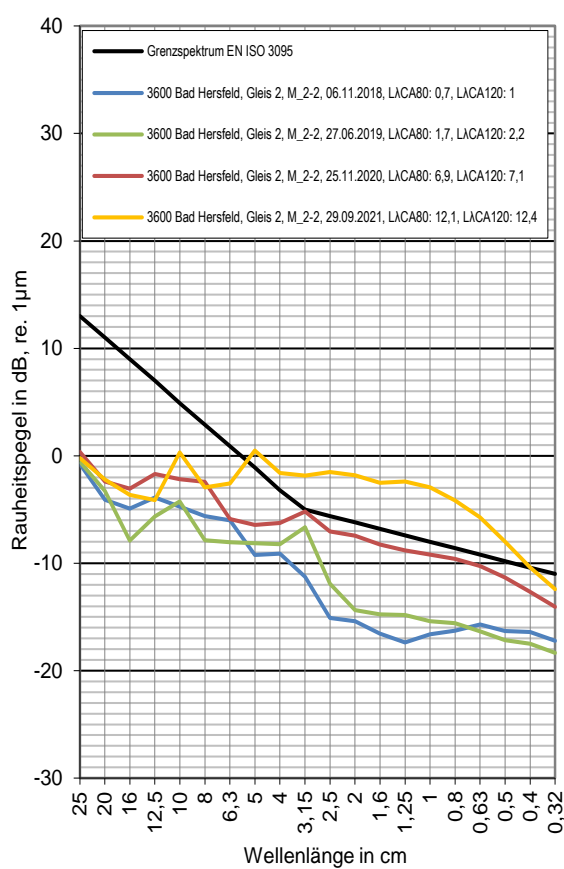
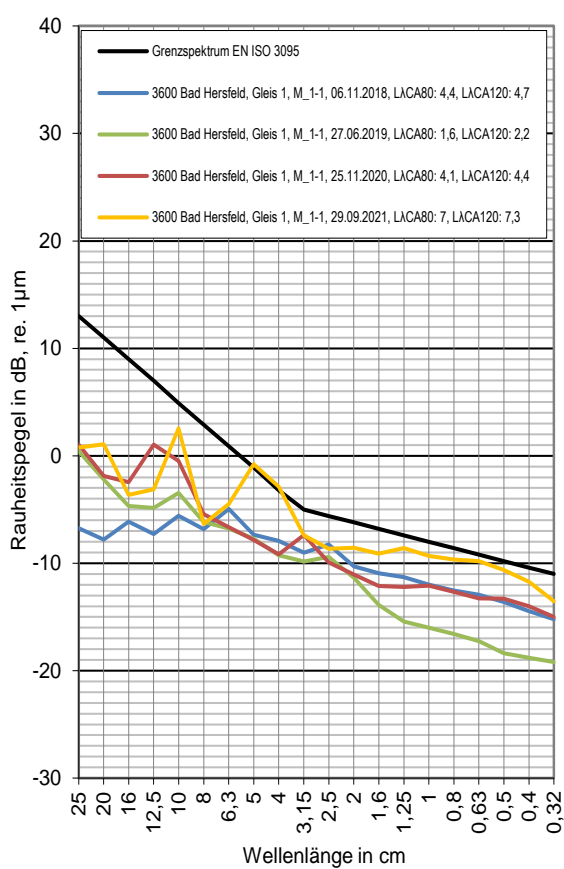
Messstelle Bad Hersfeld

Strecke 3600, km 158,4

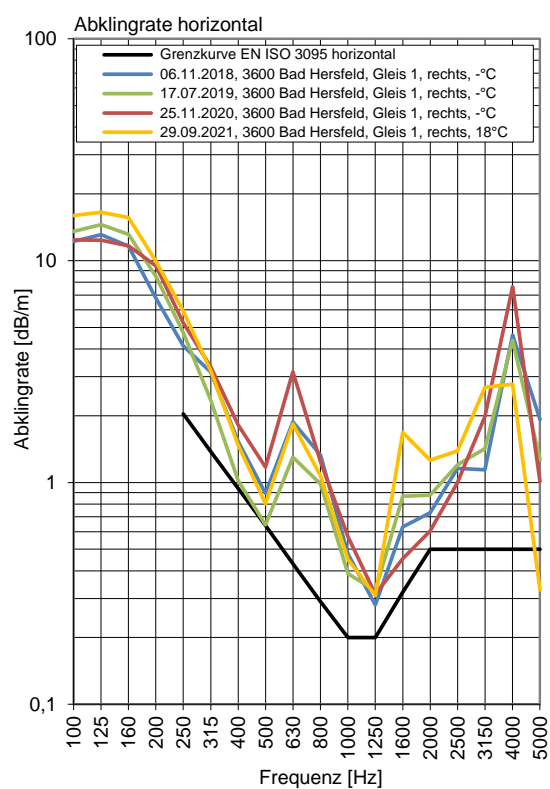
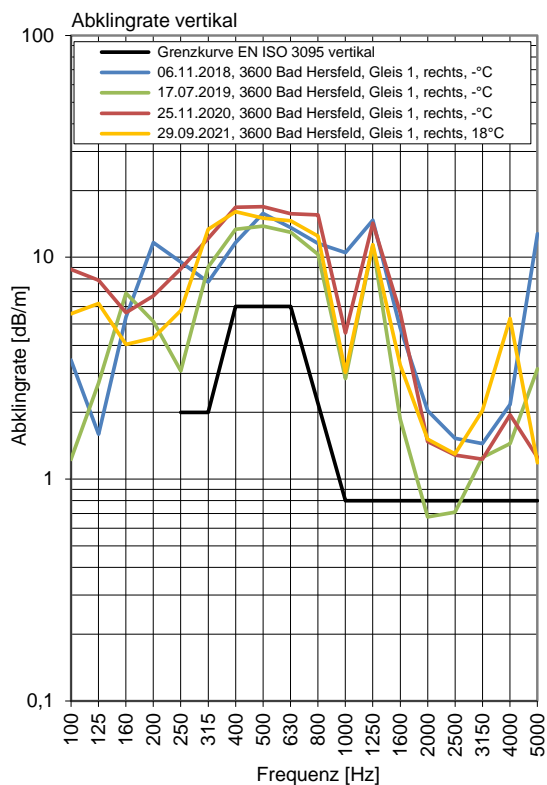
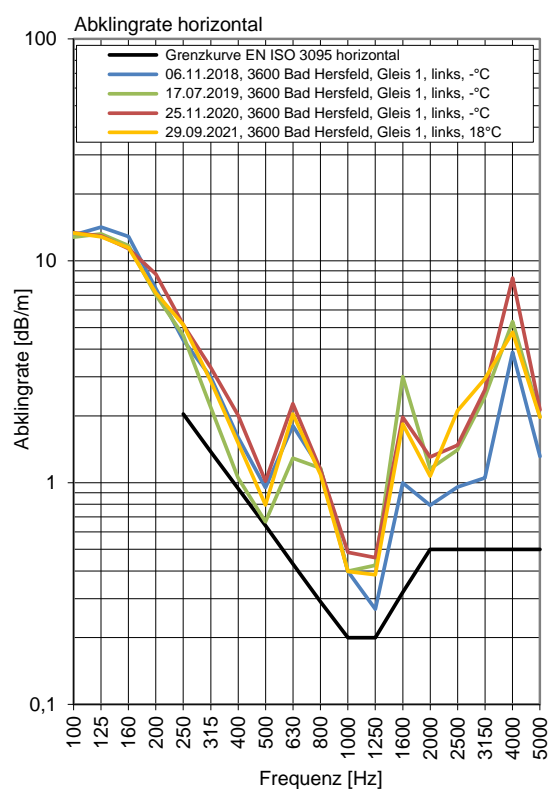
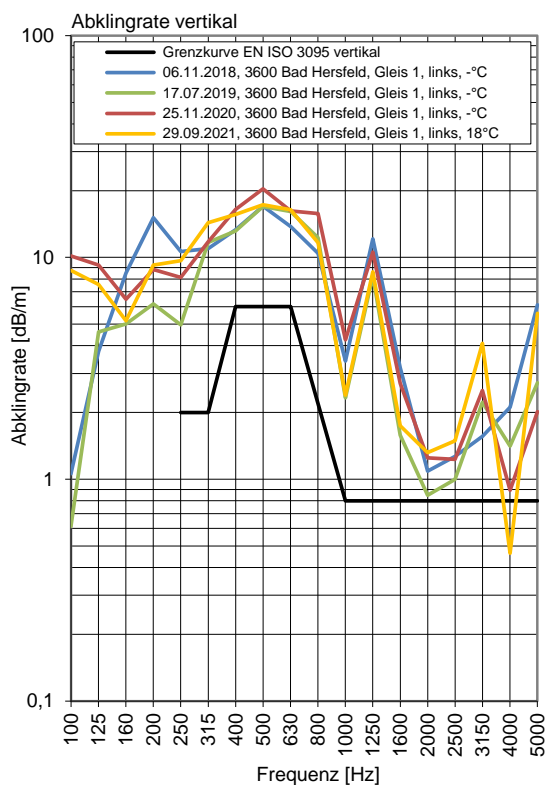
Gleis 1: Richtung Bebra

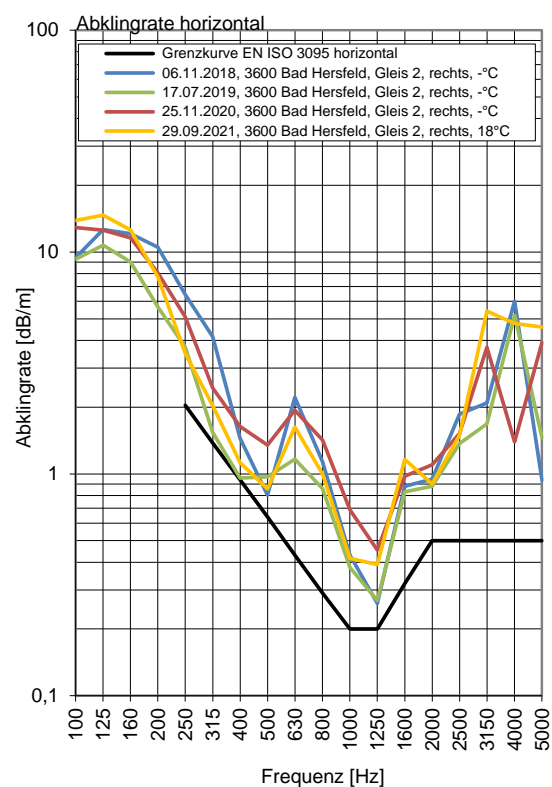
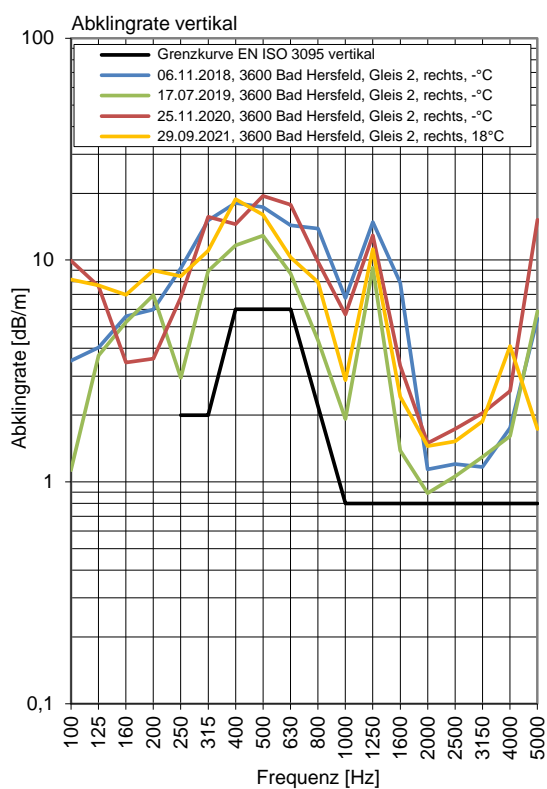
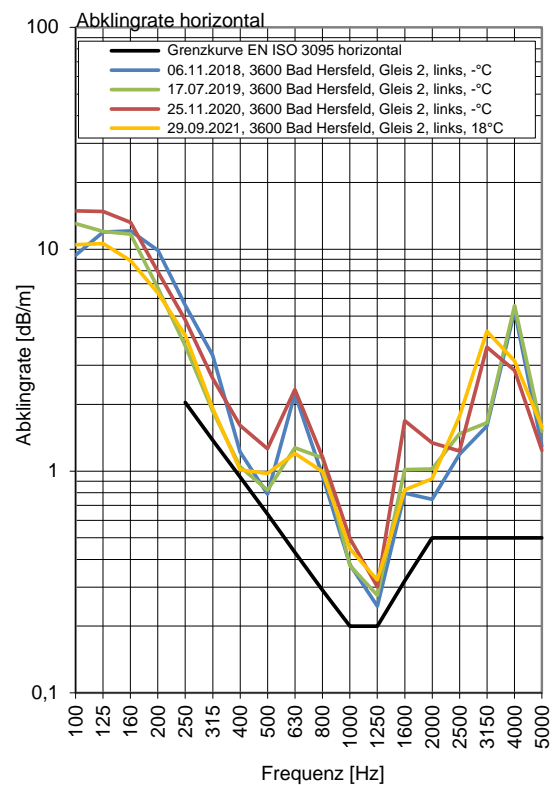
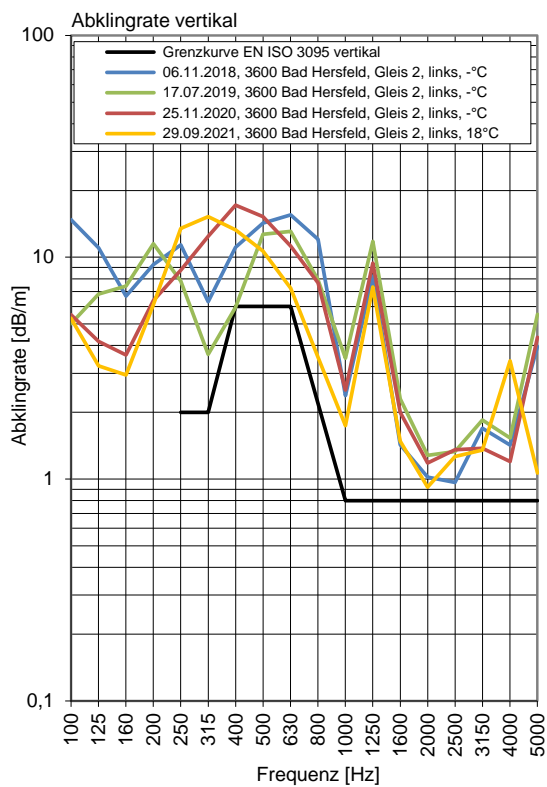
Gleis 2: Richtung Fulda

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





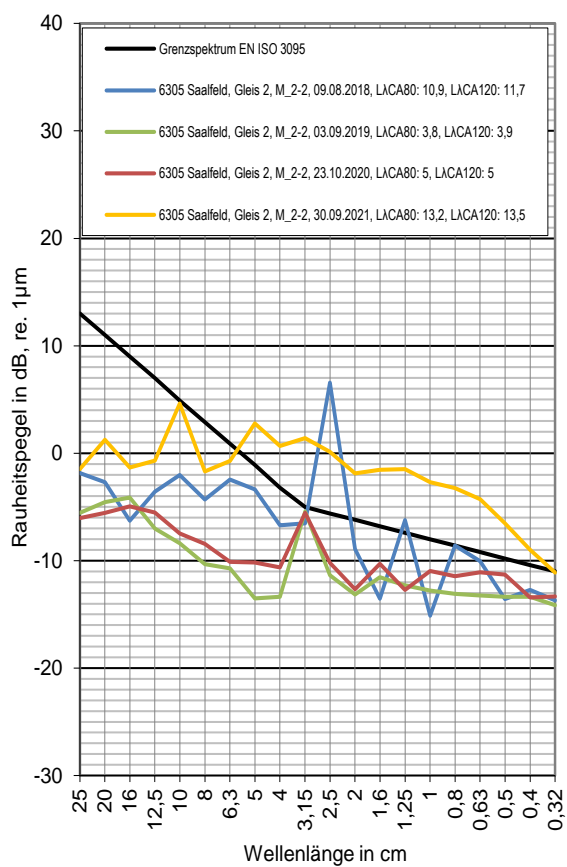
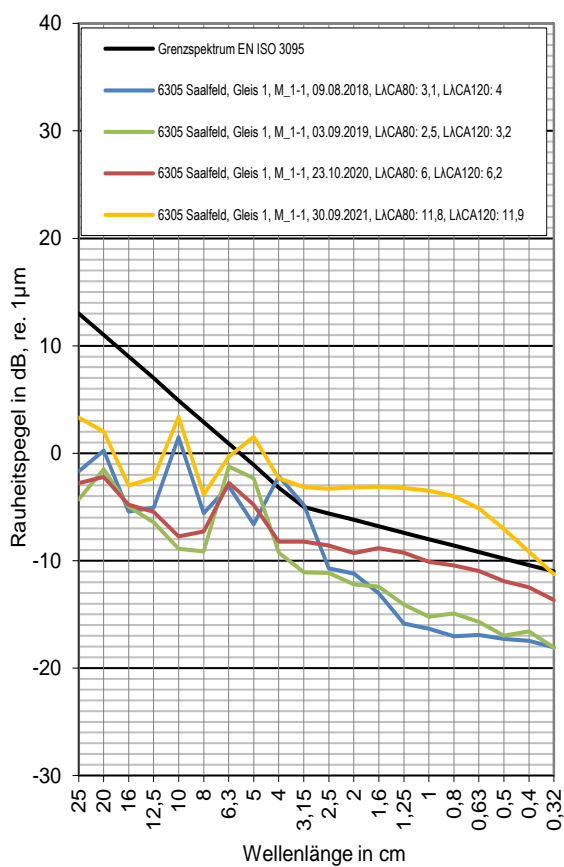
Messstelle Saalfeld

Strecke 6305, km 57,2

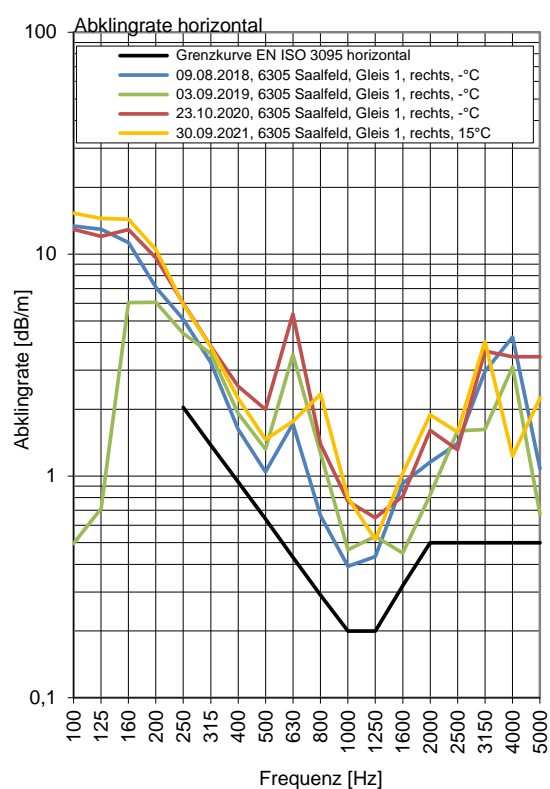
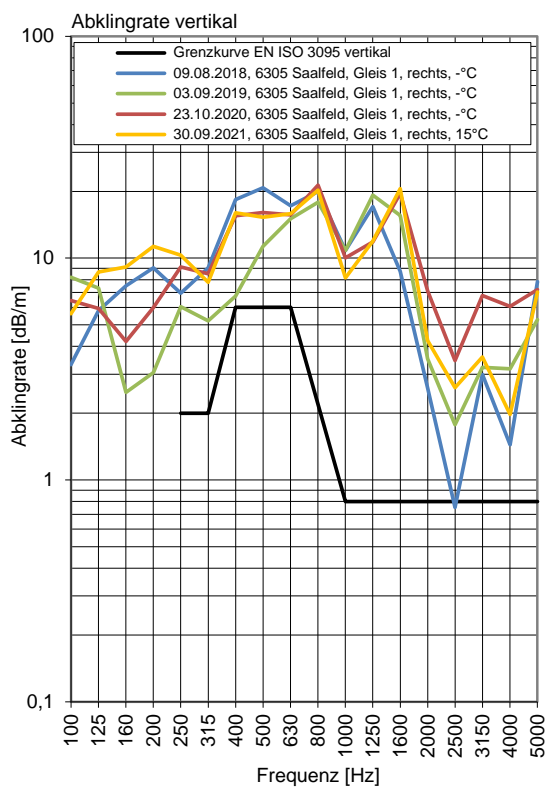
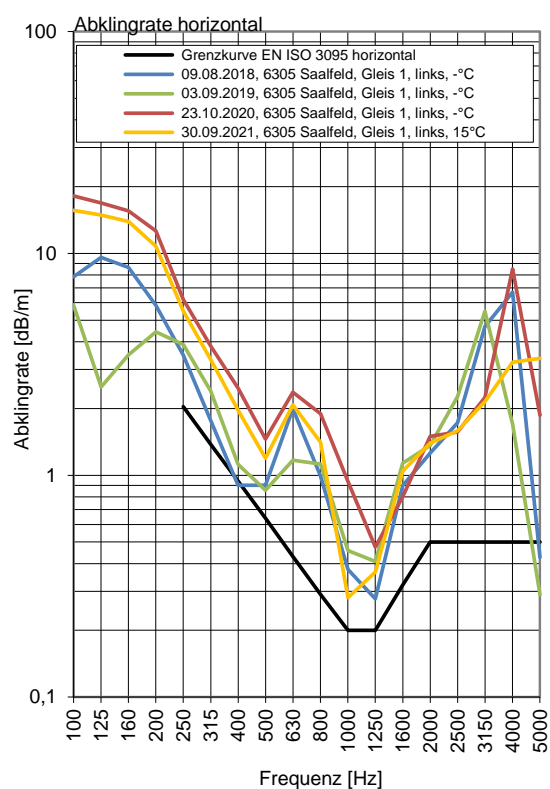
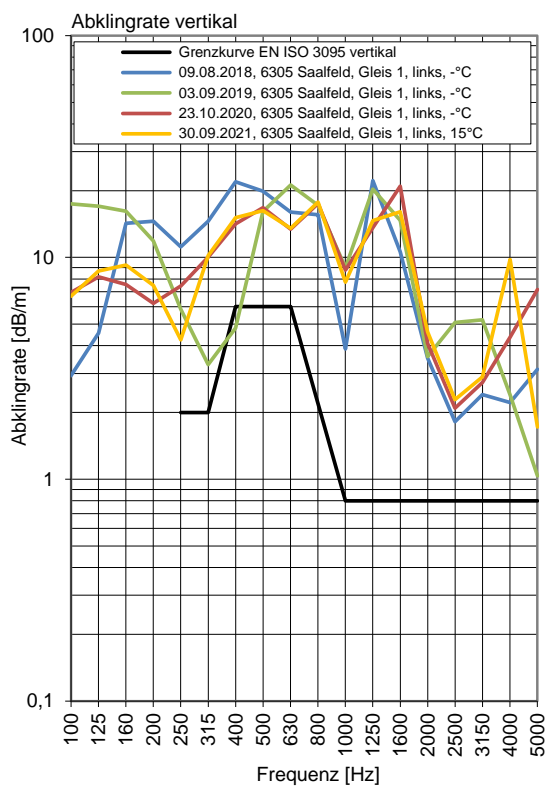
Gleis 1: Richtung Großheringen

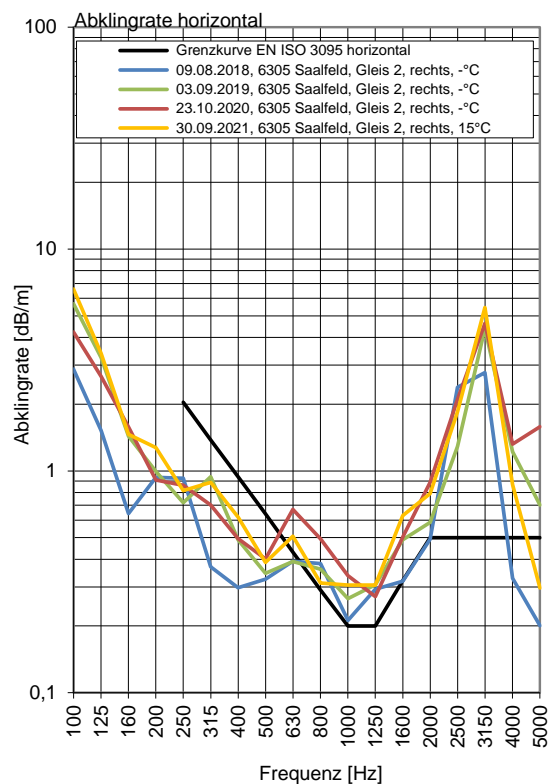
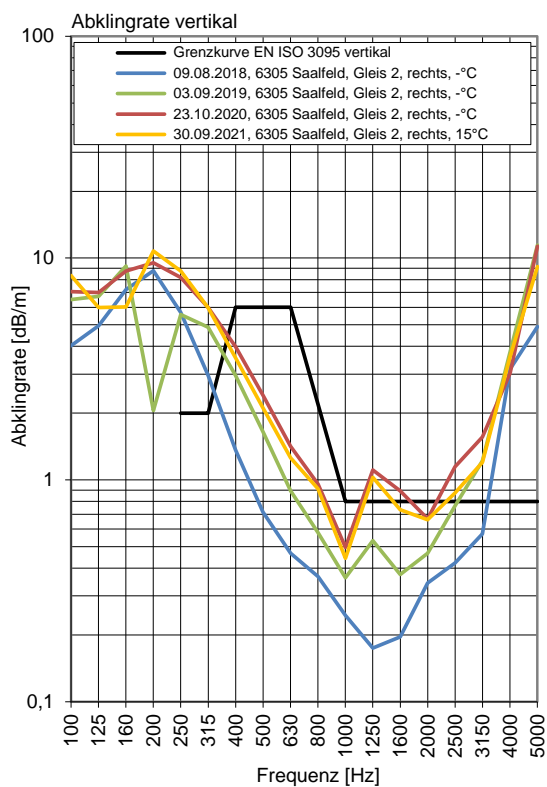
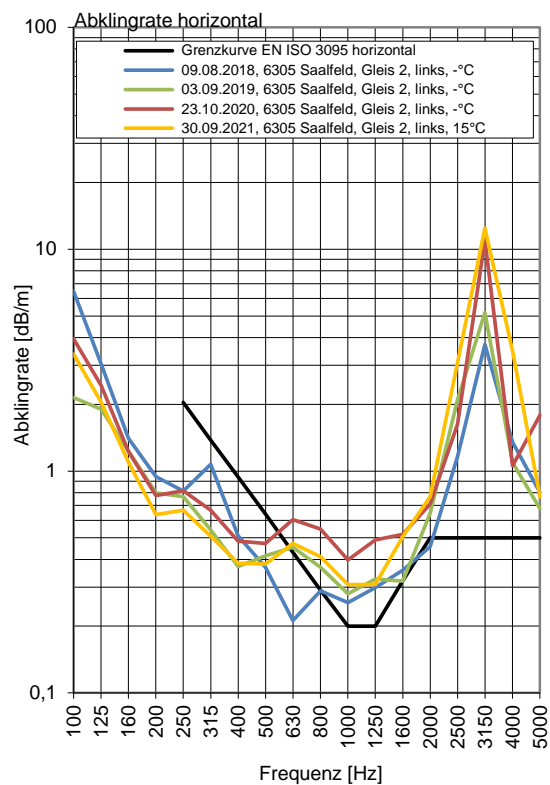
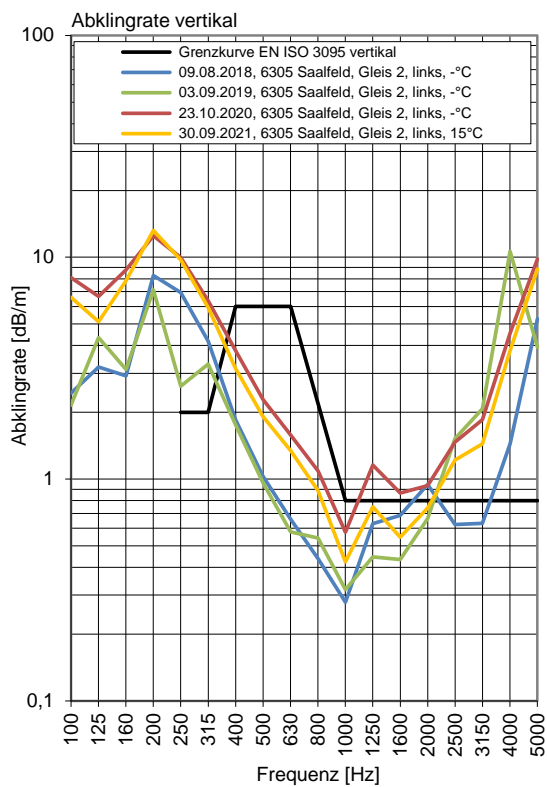
Gleis 2: Richtung Saalfeld

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





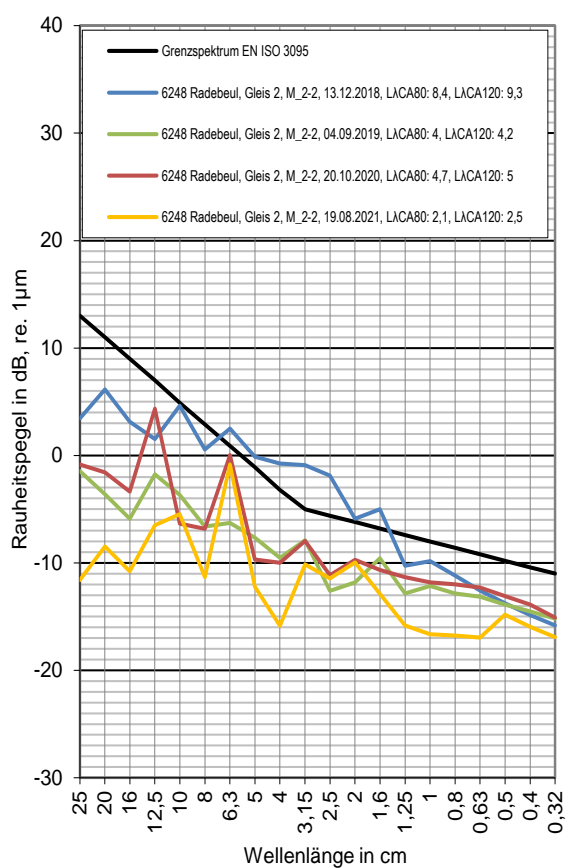
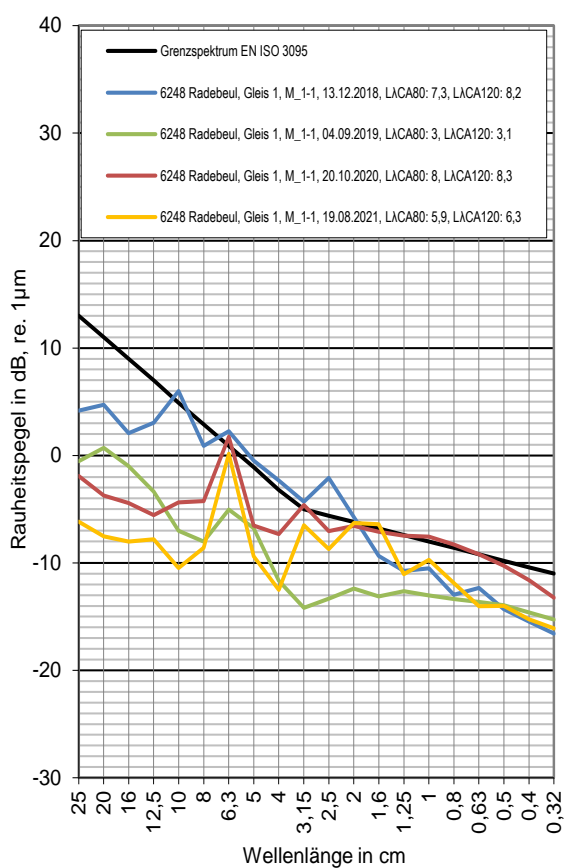
Messstelle Radebeul

Strecke 6248, km 18,8

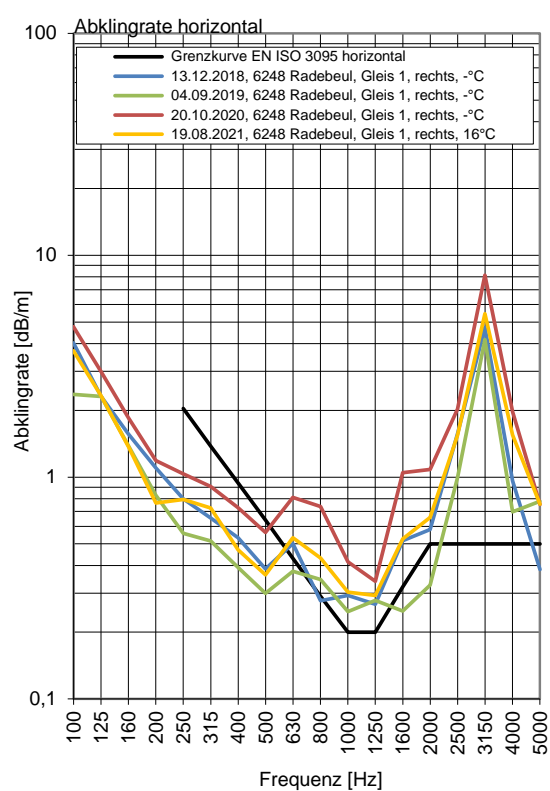
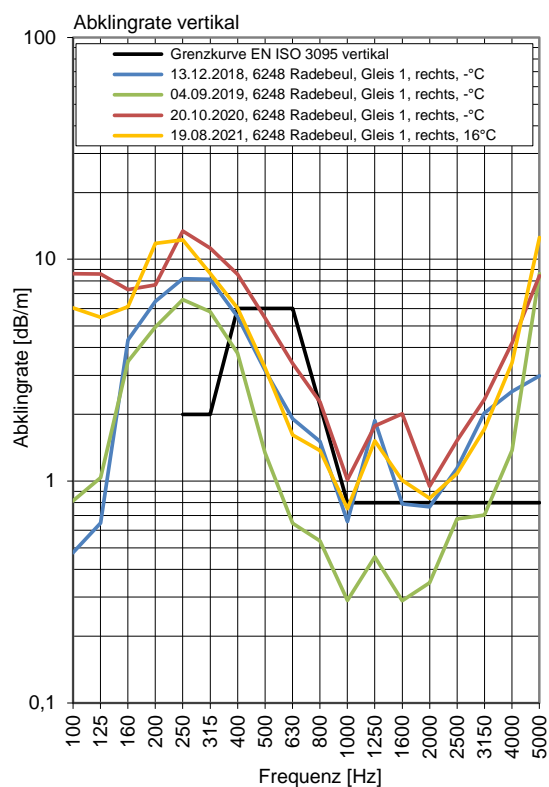
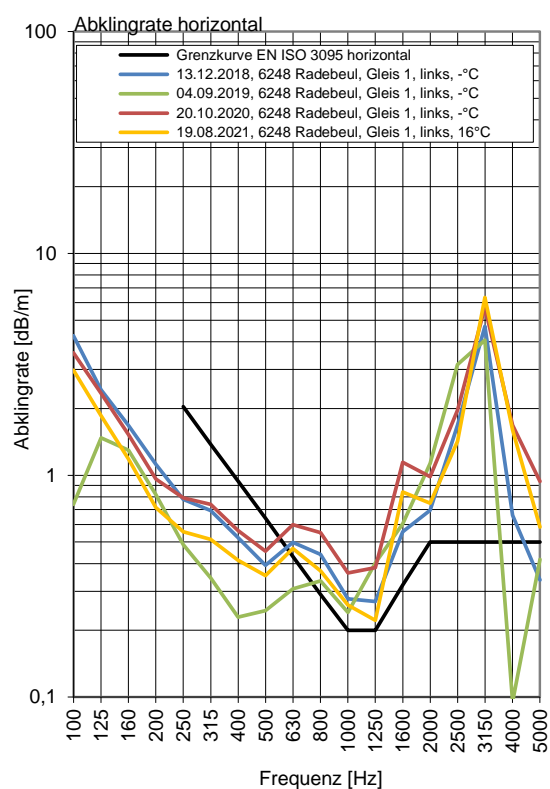
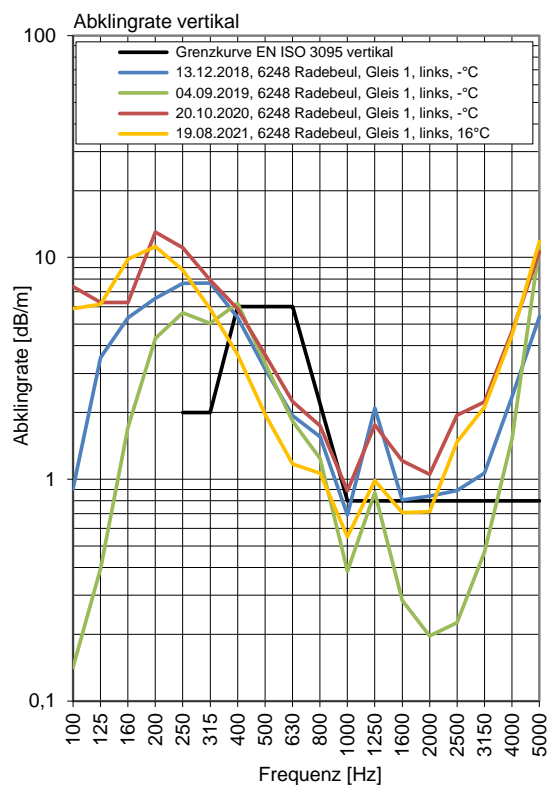
Gleis 1: Richtung Berlin

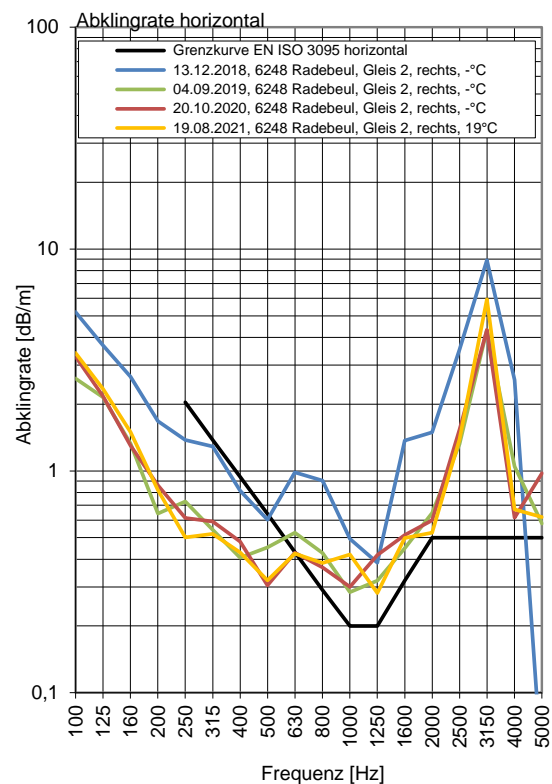
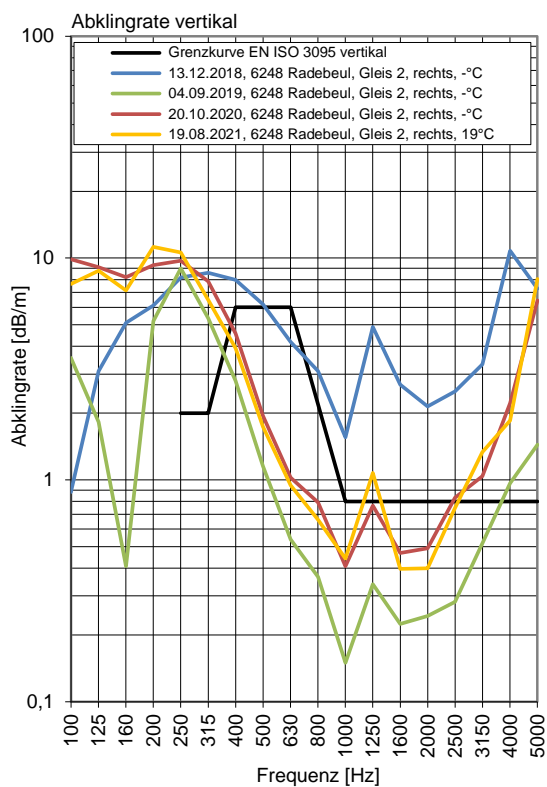
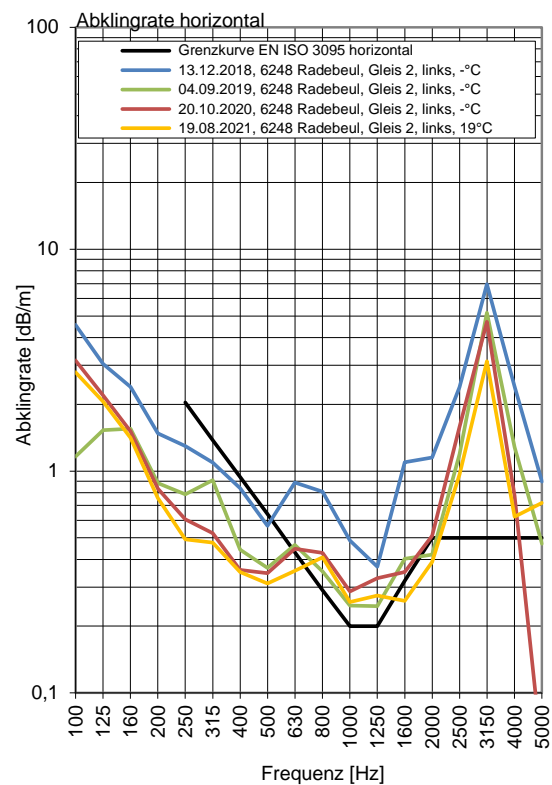
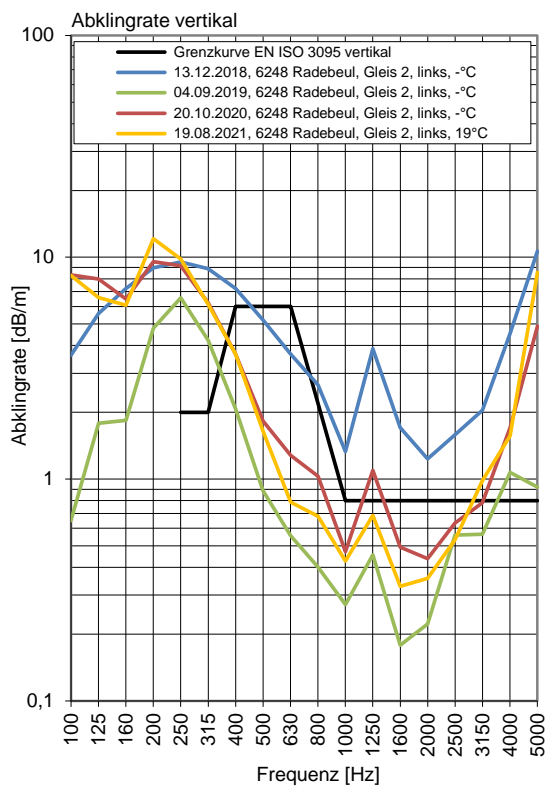
Gleis 2: Richtung Dresden

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





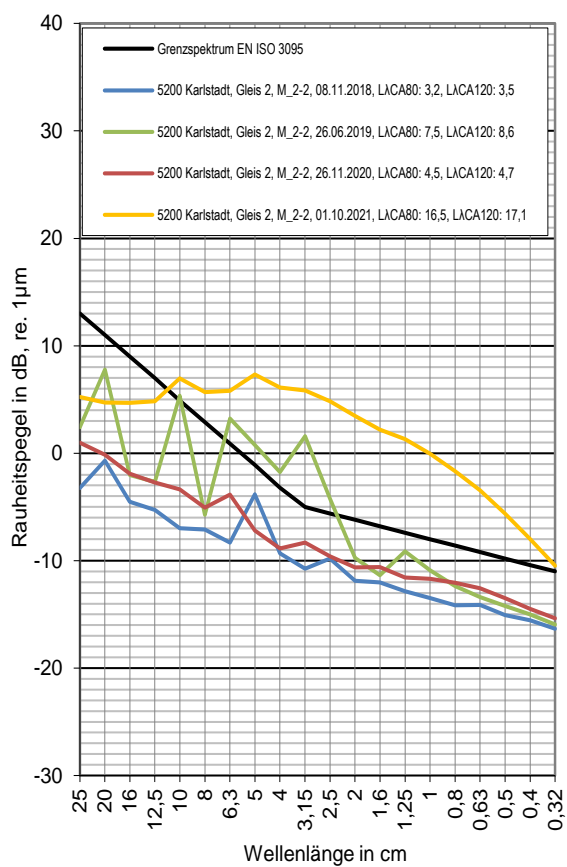
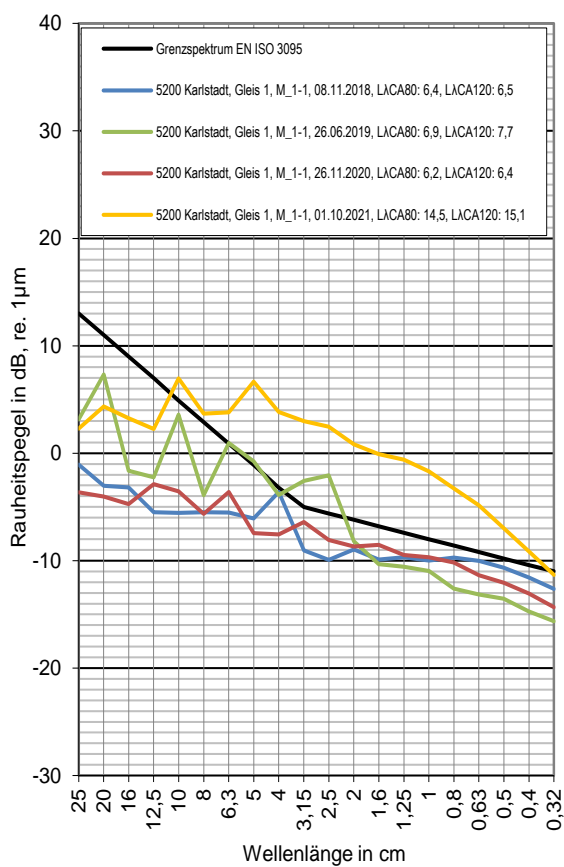
Messstelle Karlstadt

Strecke 5200, km 18,2

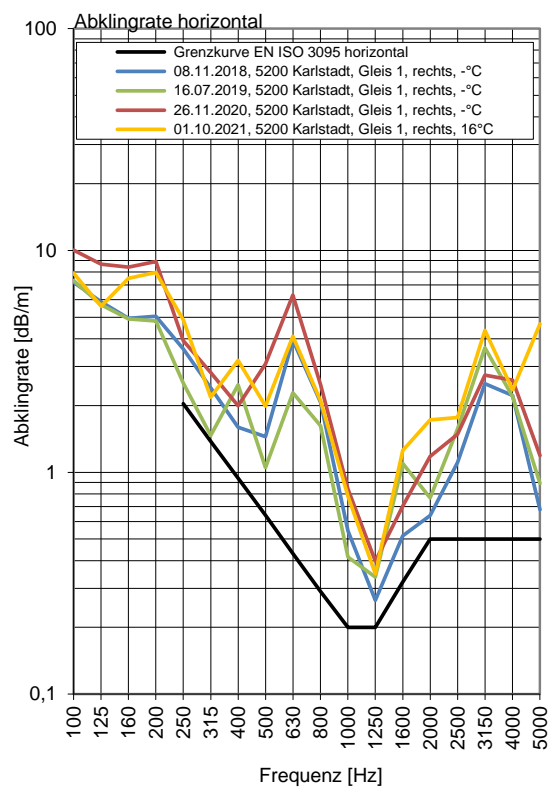
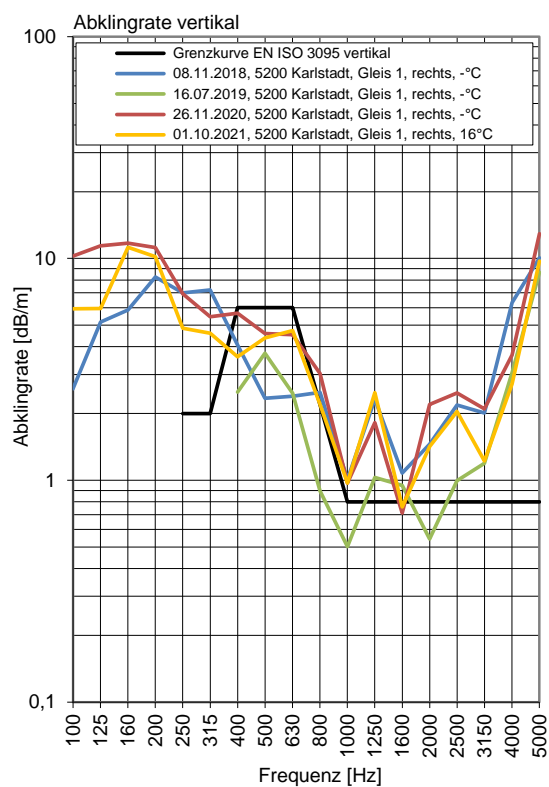
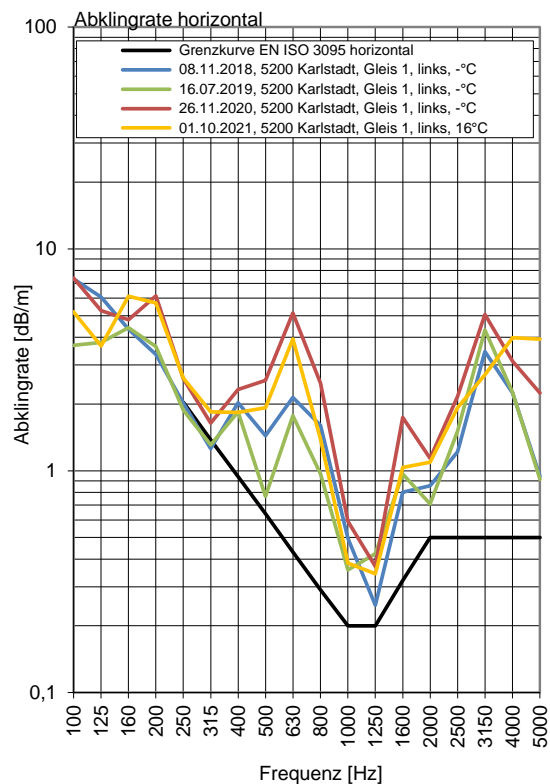
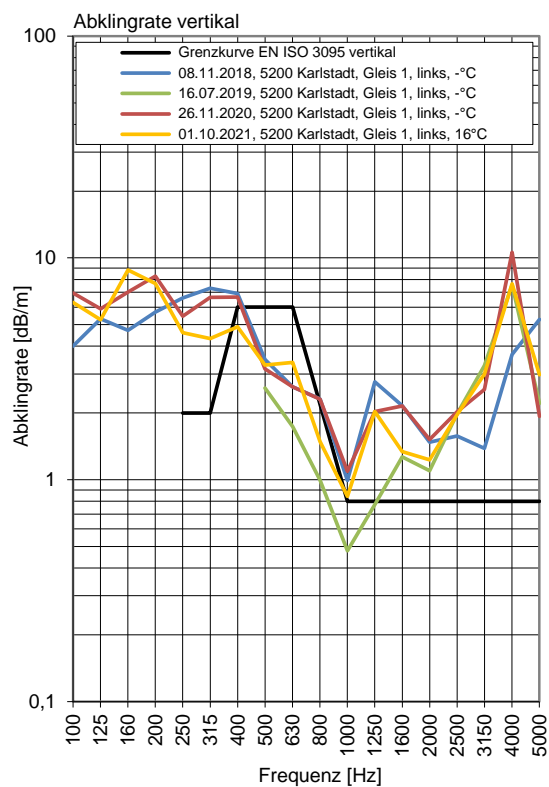
Gleis 1: Richtung Aschaffenburg

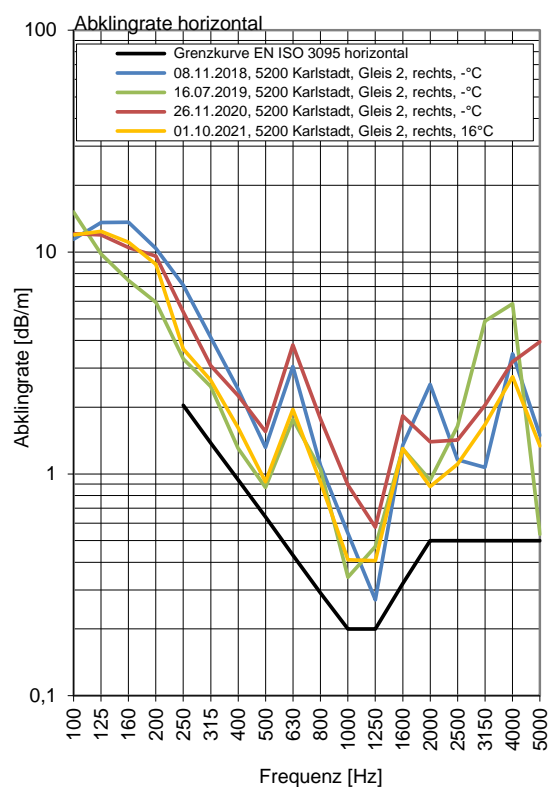
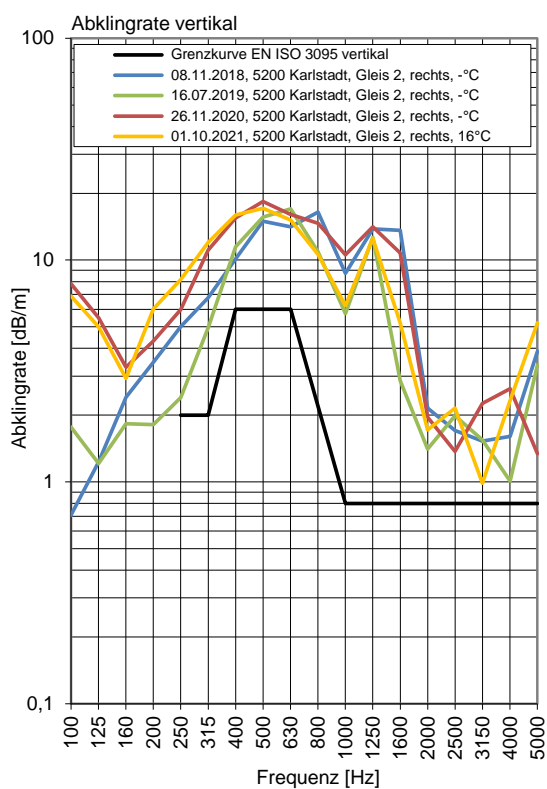
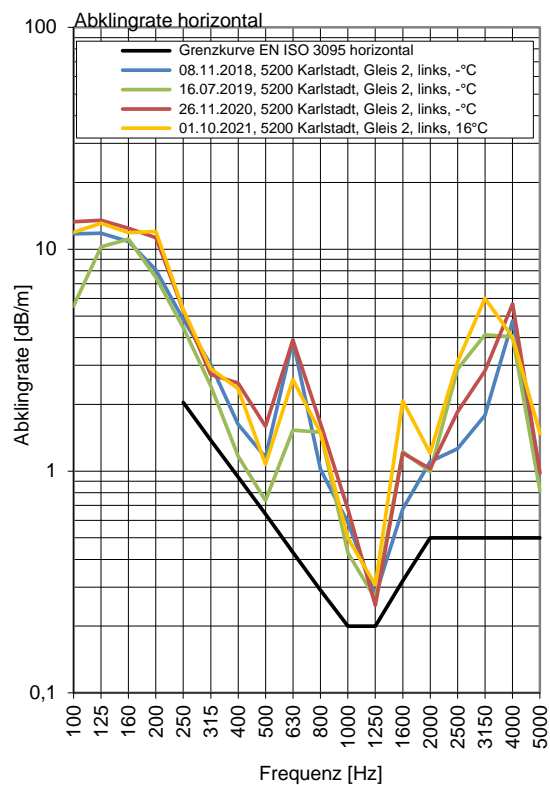
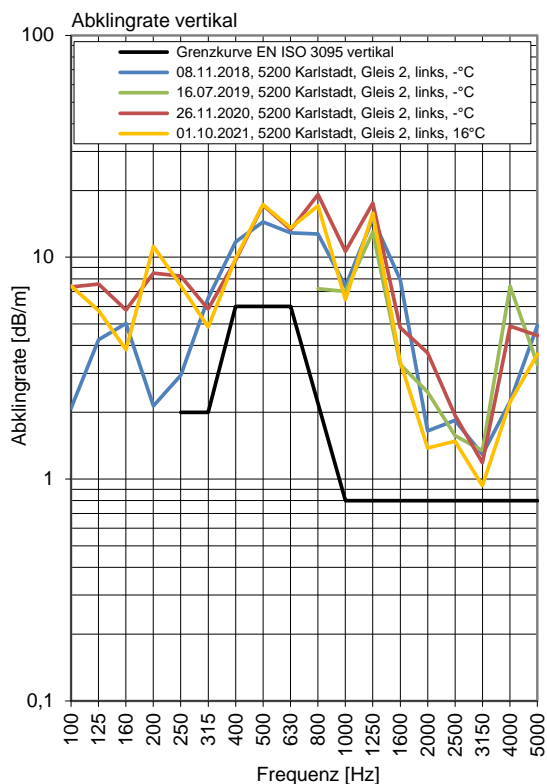
Gleis 2: Richtung Würzburg

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





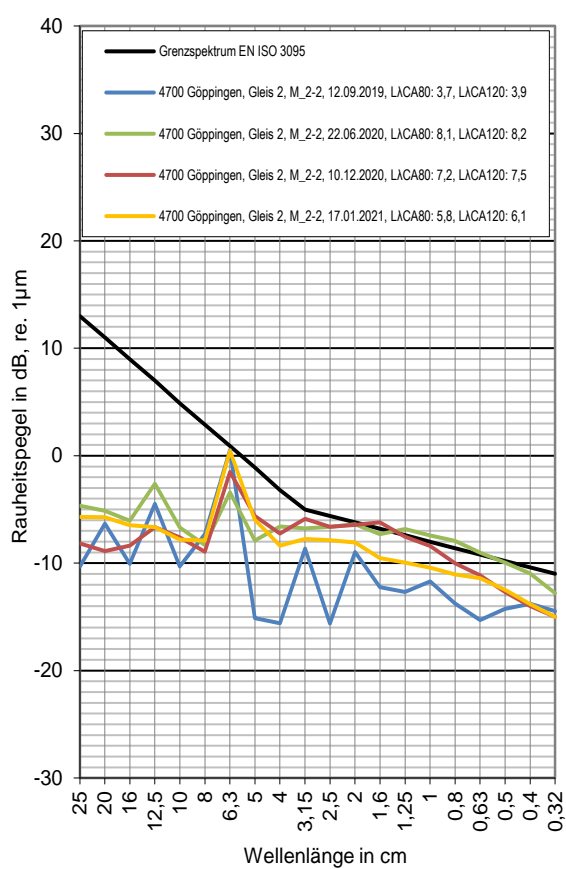
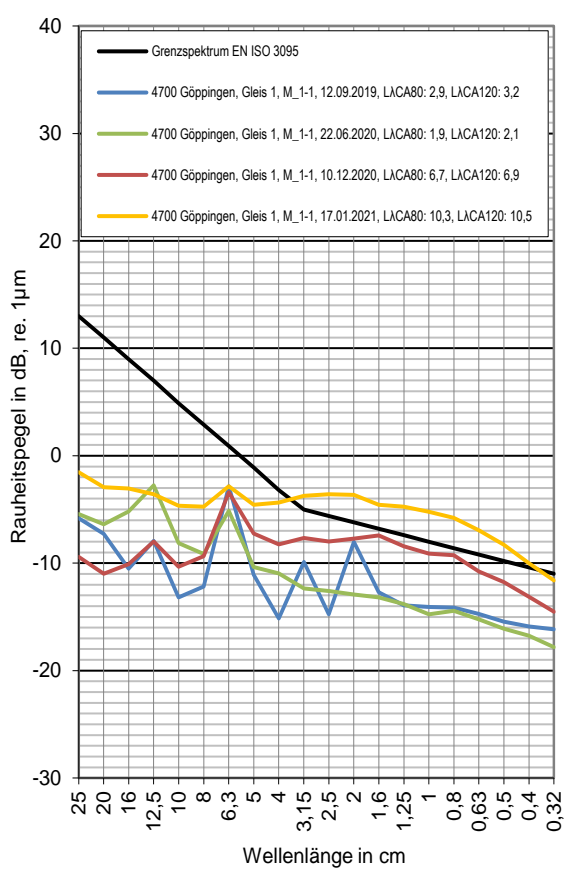
Messstelle Göppingen

Strecke 4700, km 51,2

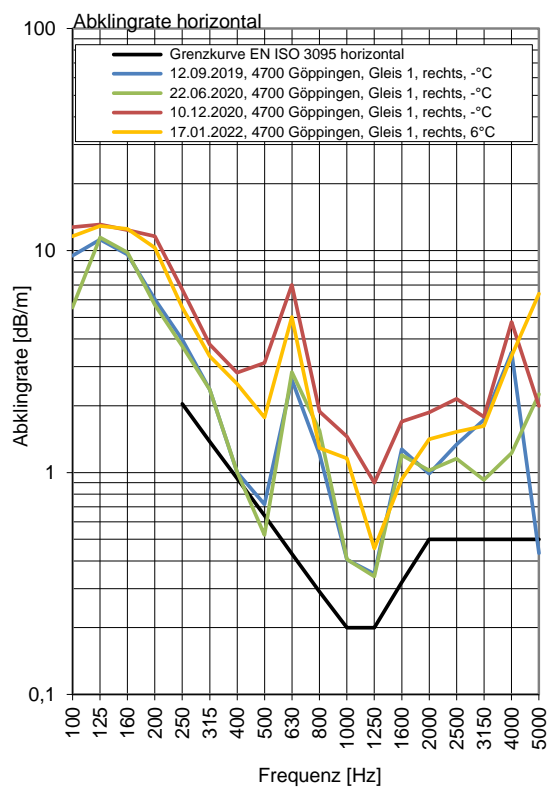
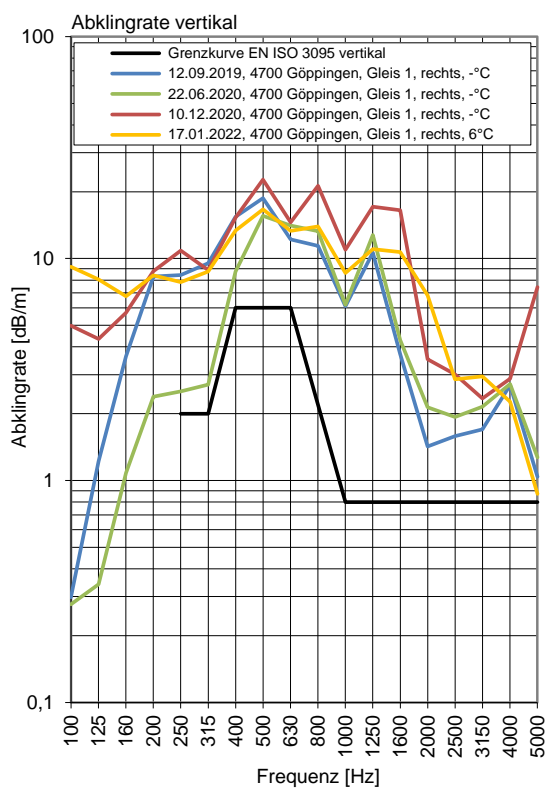
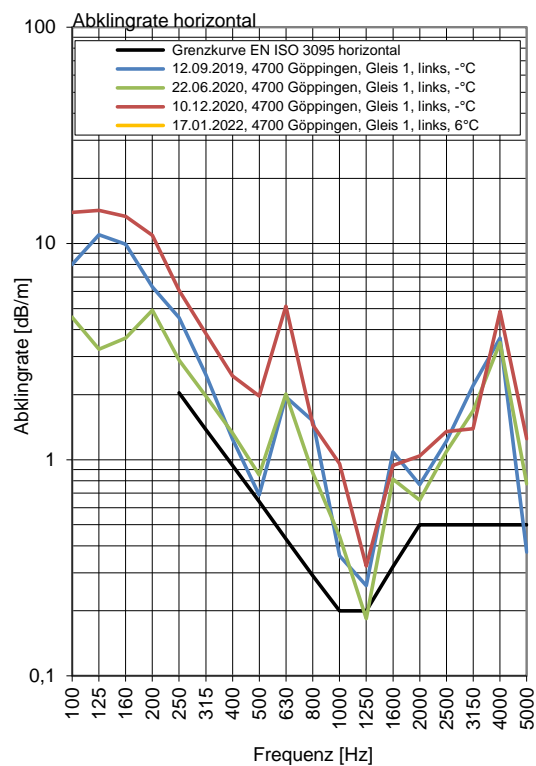
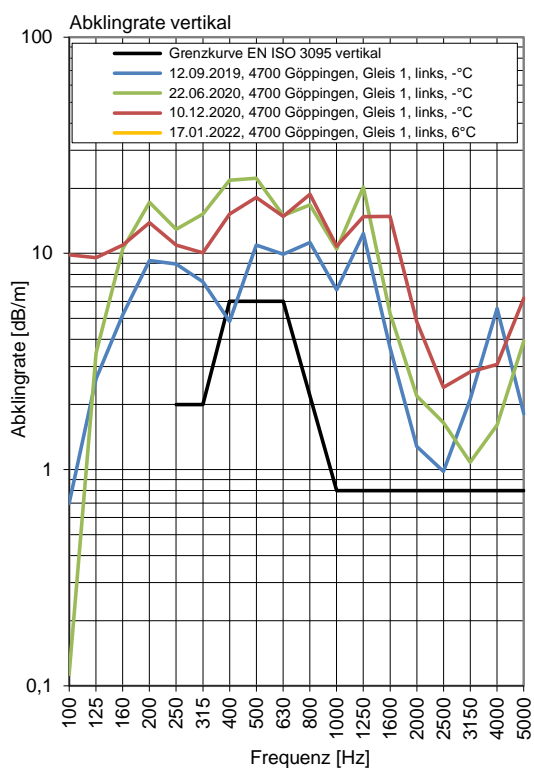
Gleis 1: Richtung Stuttgart

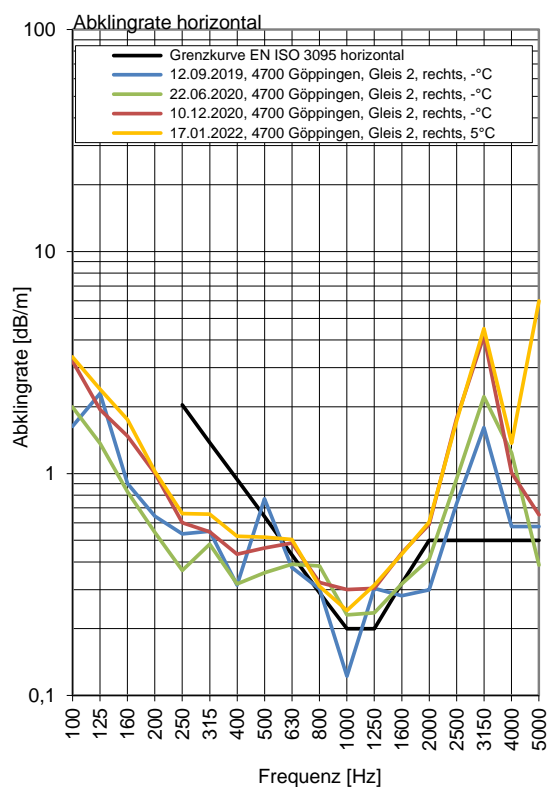
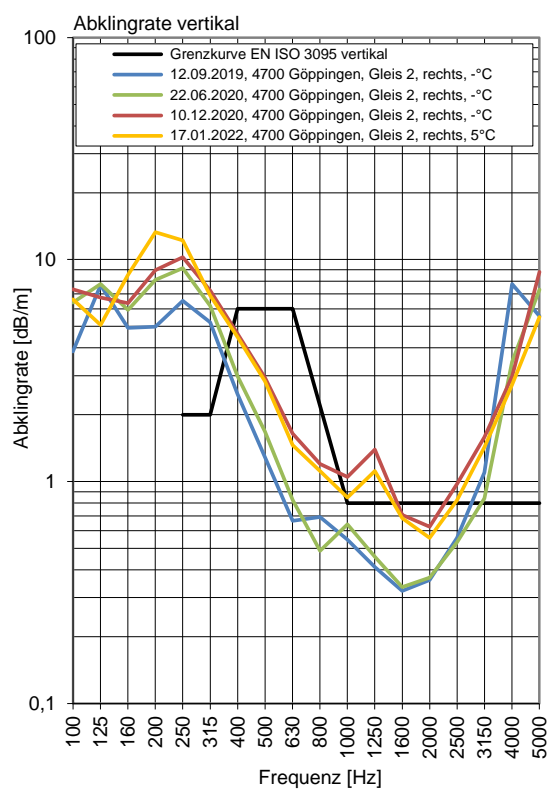
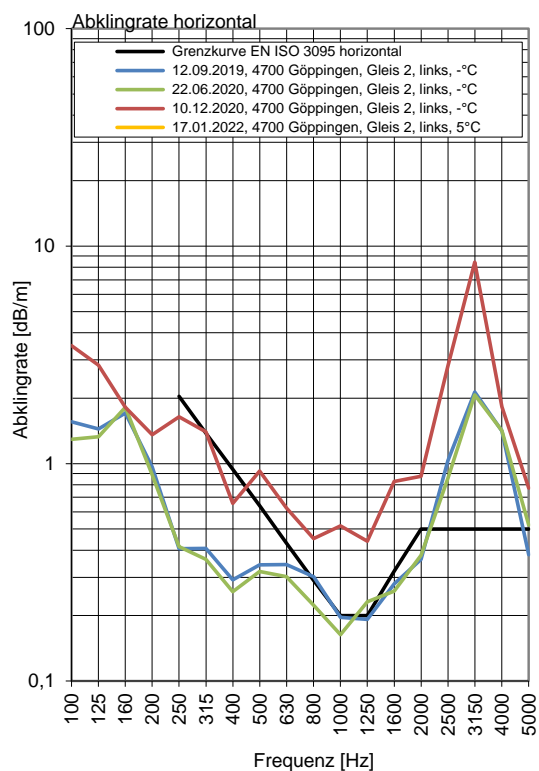
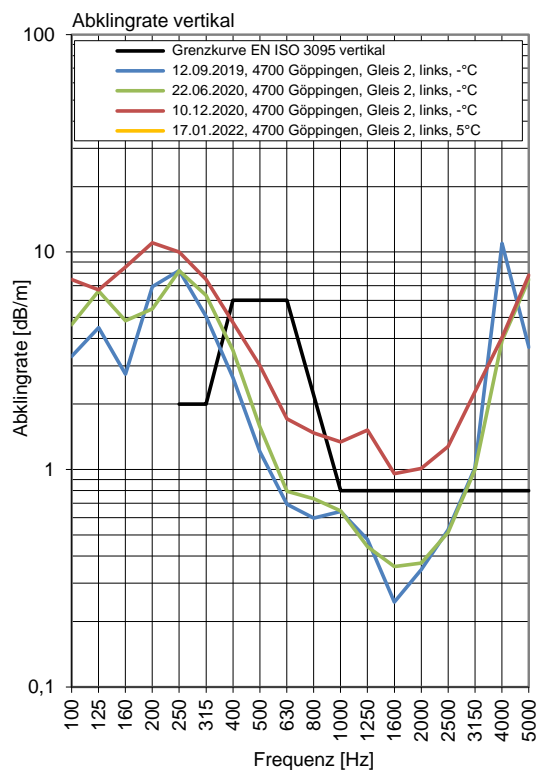
Gleis 2: Richtung Ulm

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





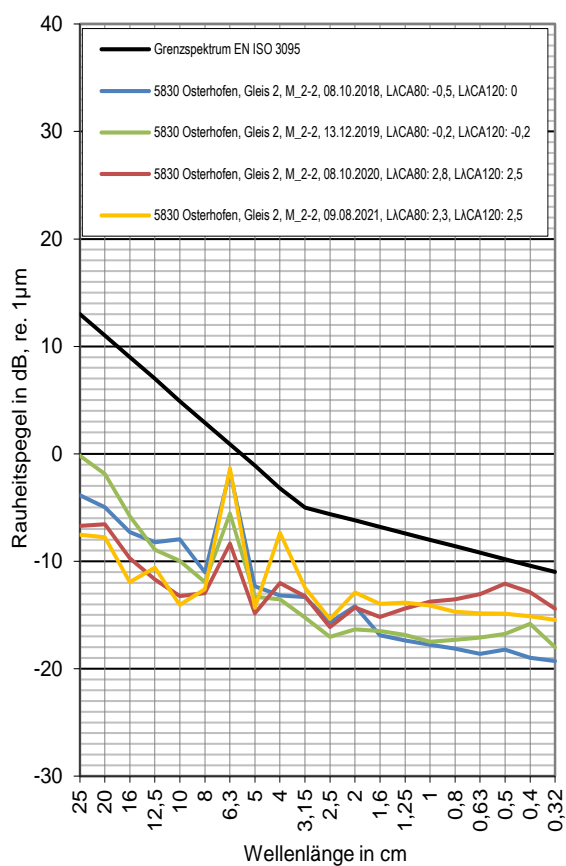
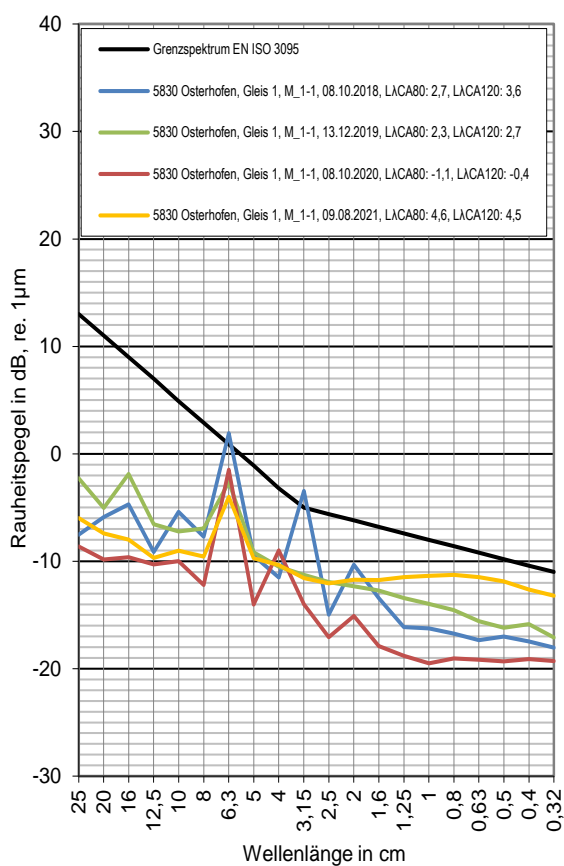
Messstelle Osterhofen

Strecke 5830, km 30,1

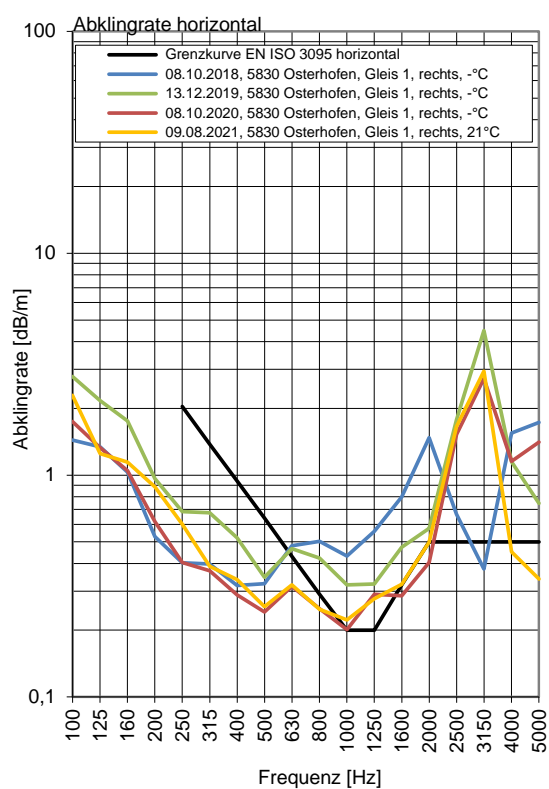
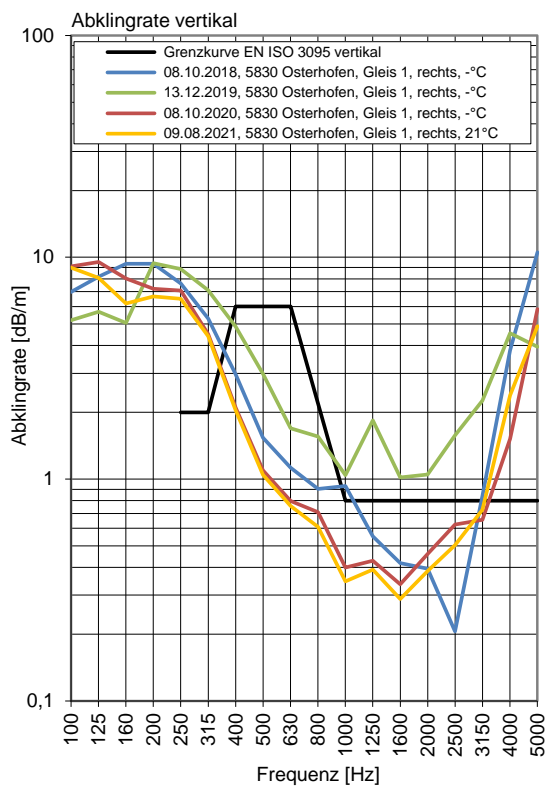
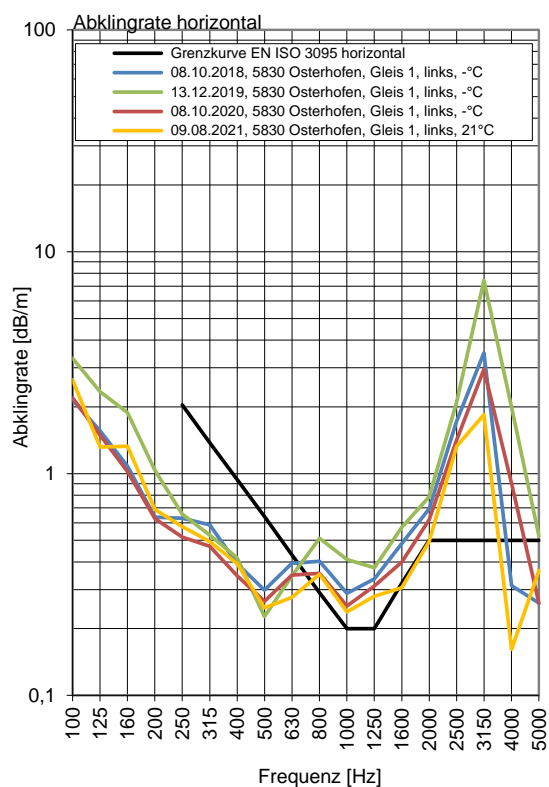
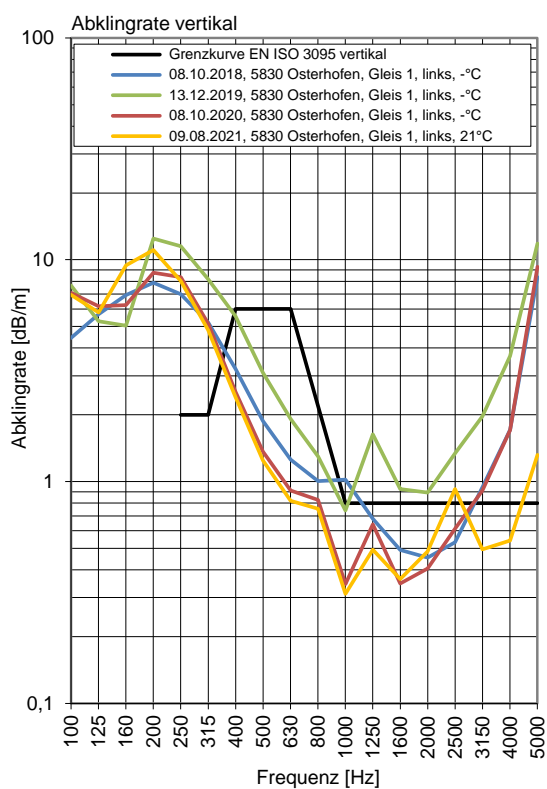
Gleis 1: Richtung Regensburg

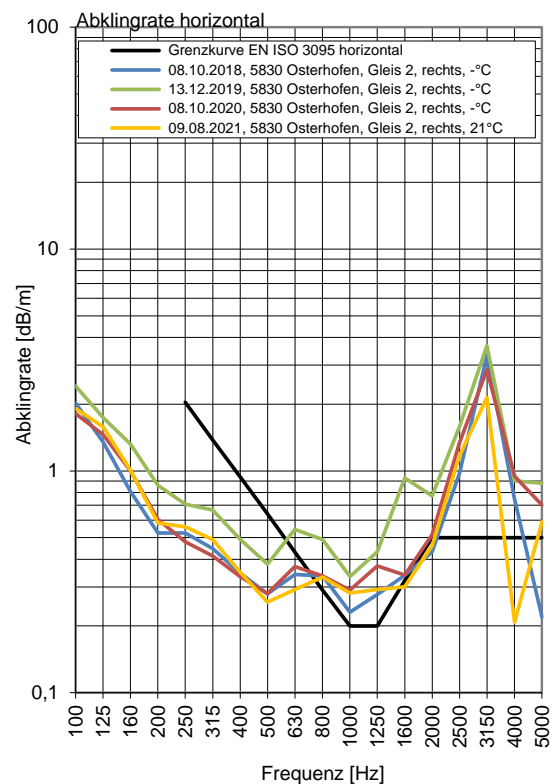
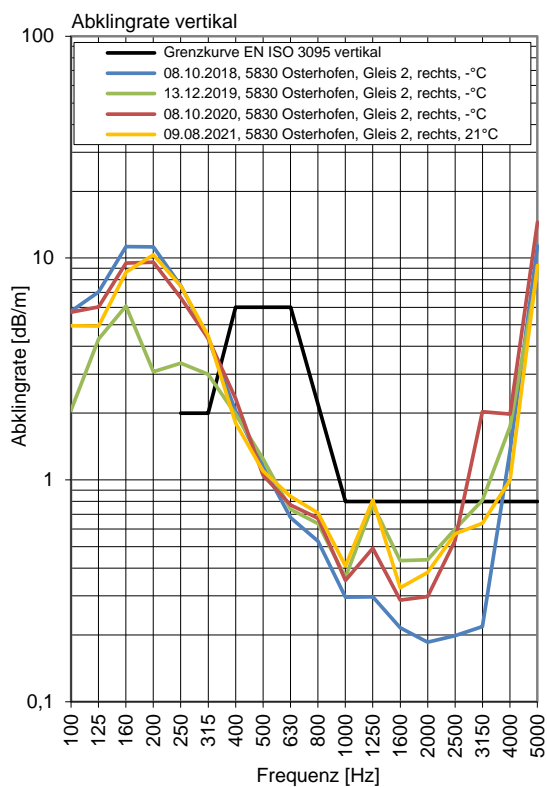
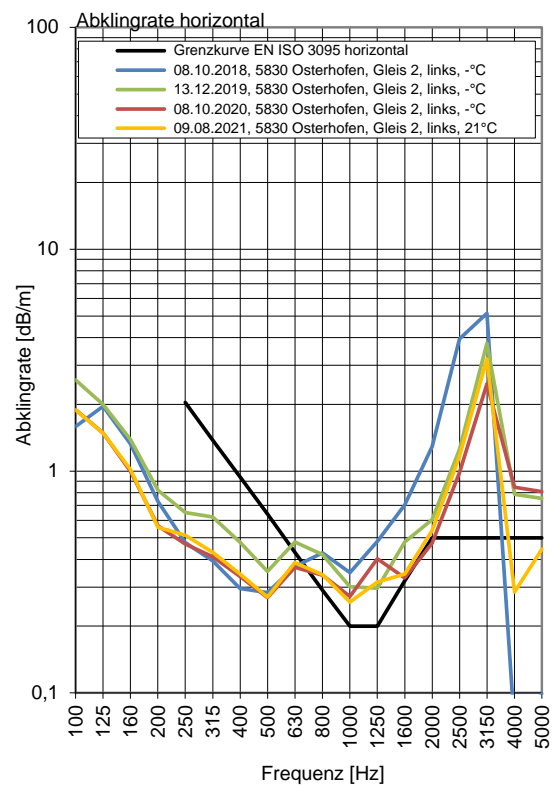
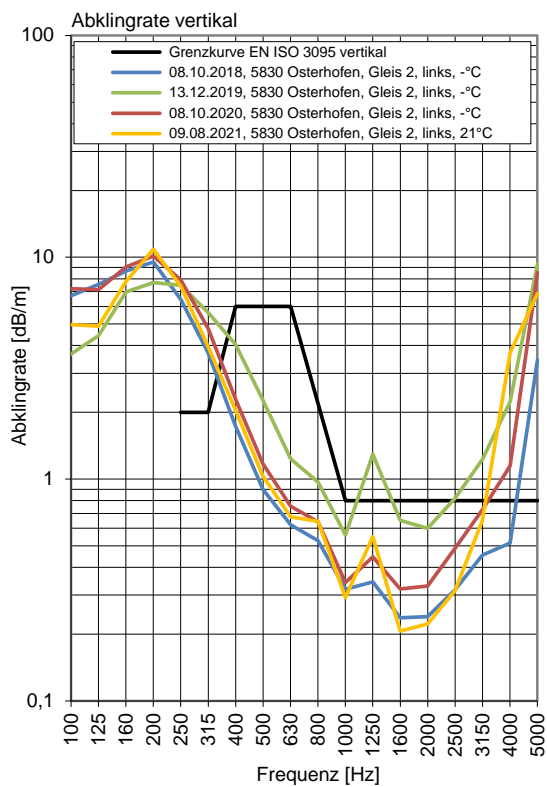
Gleis 2: Richtung Passau

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





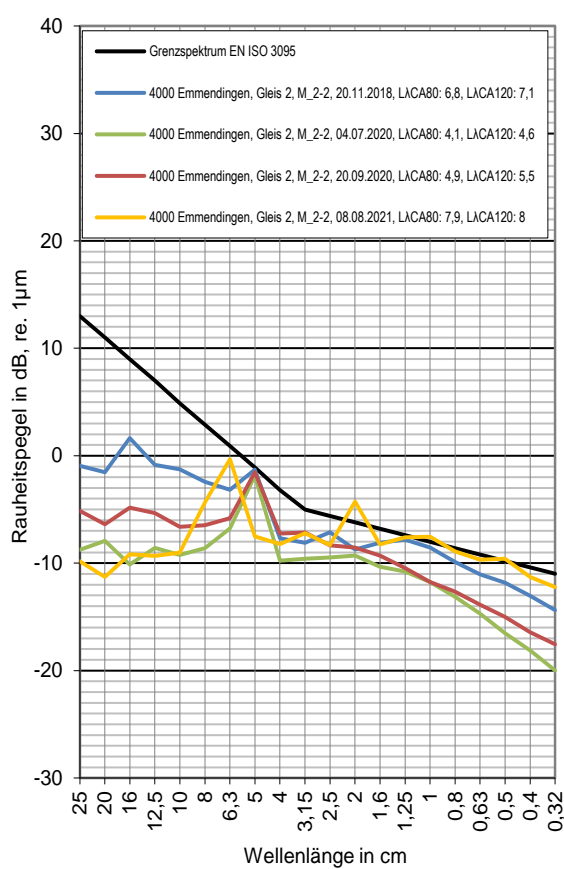
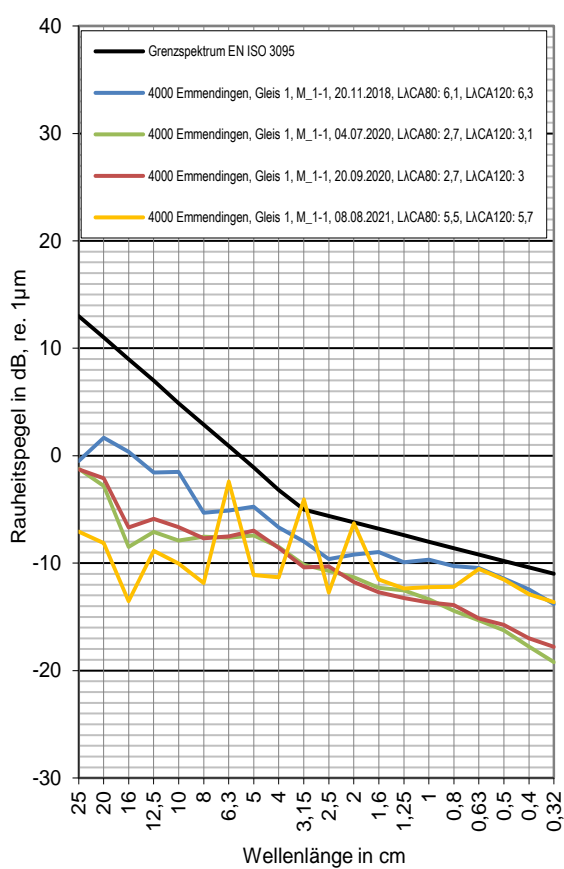
Messstelle Emmendingen

Strecke 4000, km 197,8

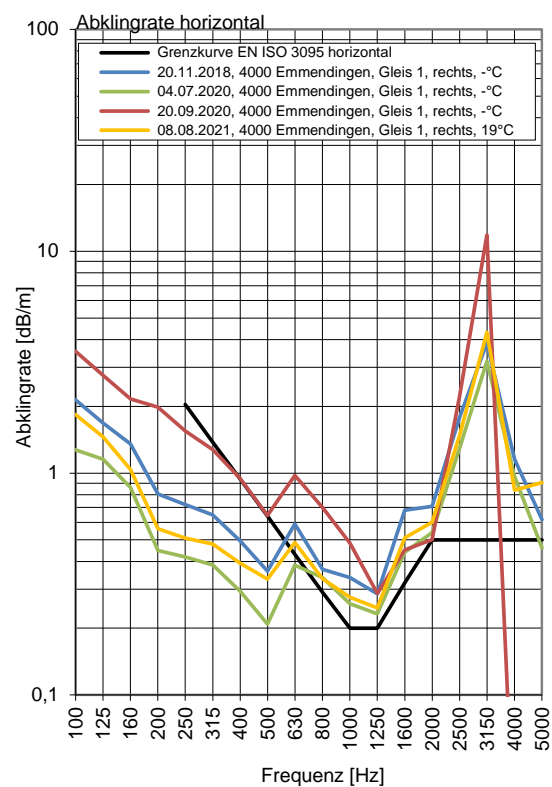
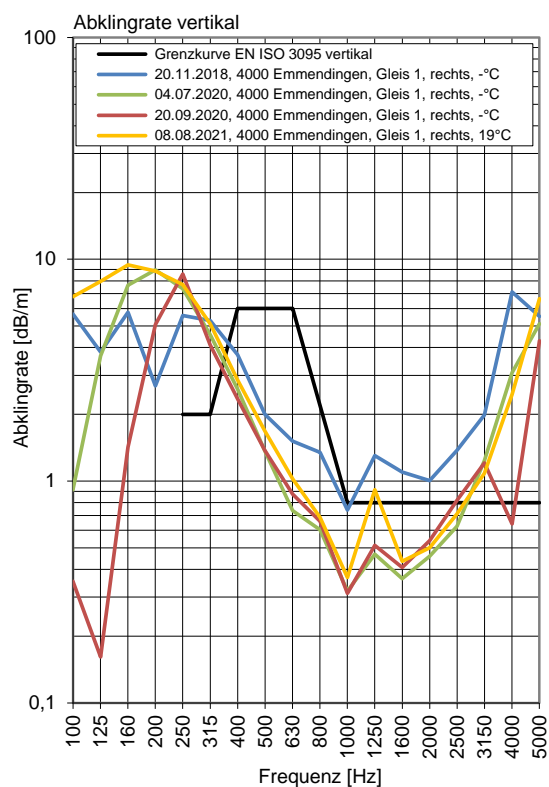
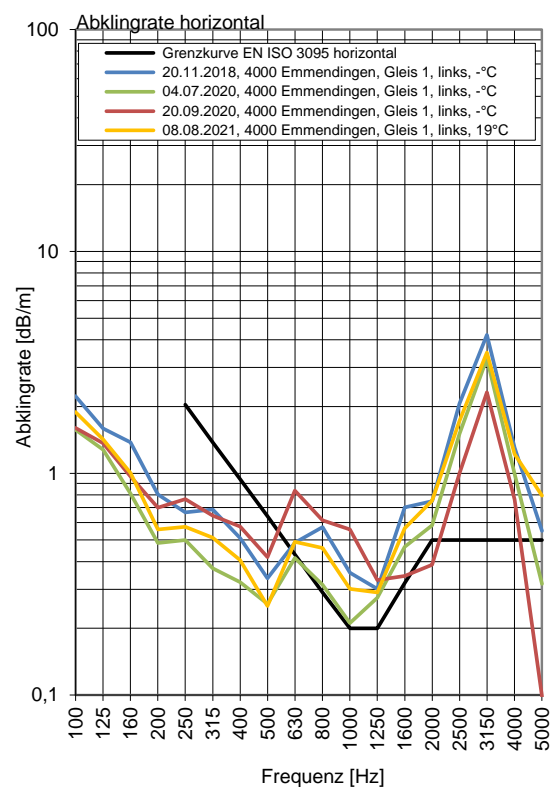
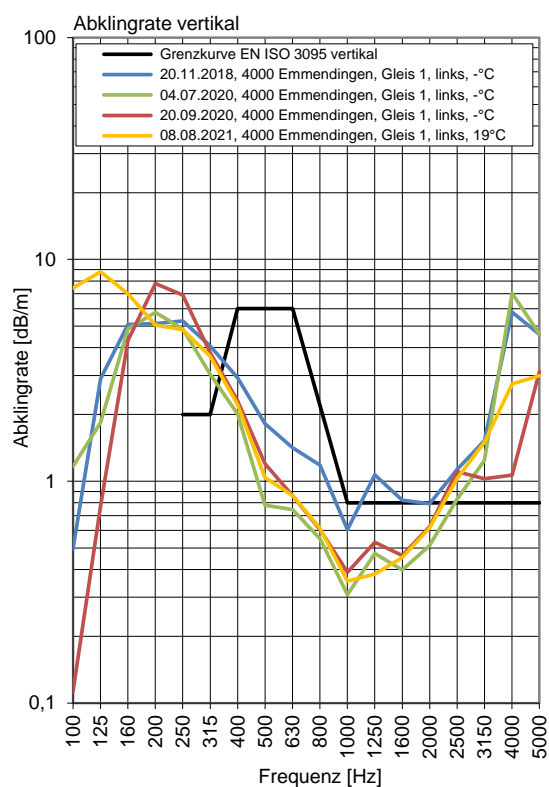
Gleis 1: Richtung Mannheim

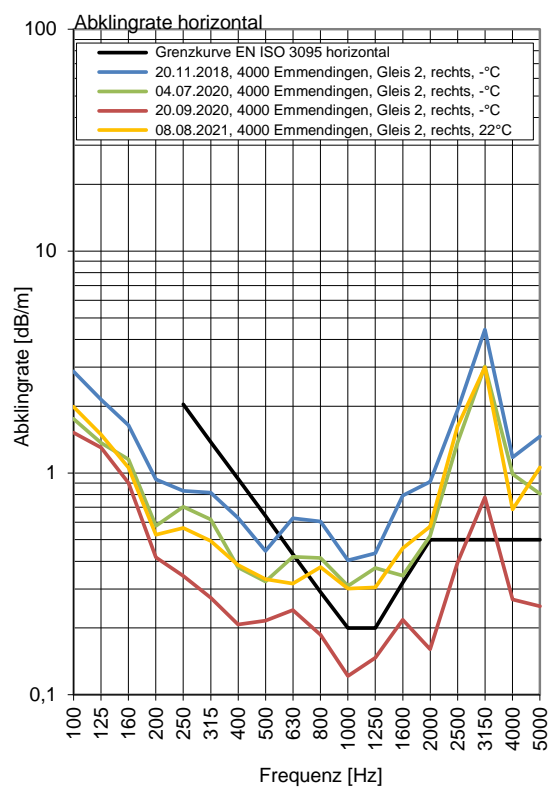
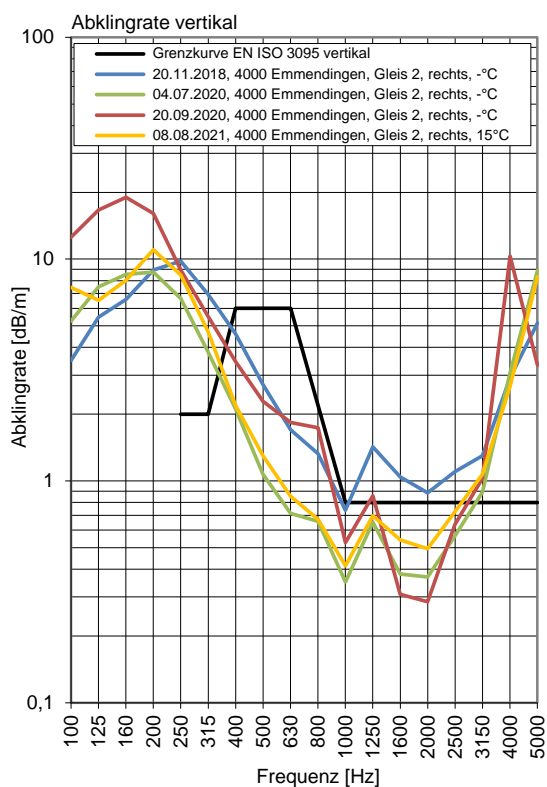
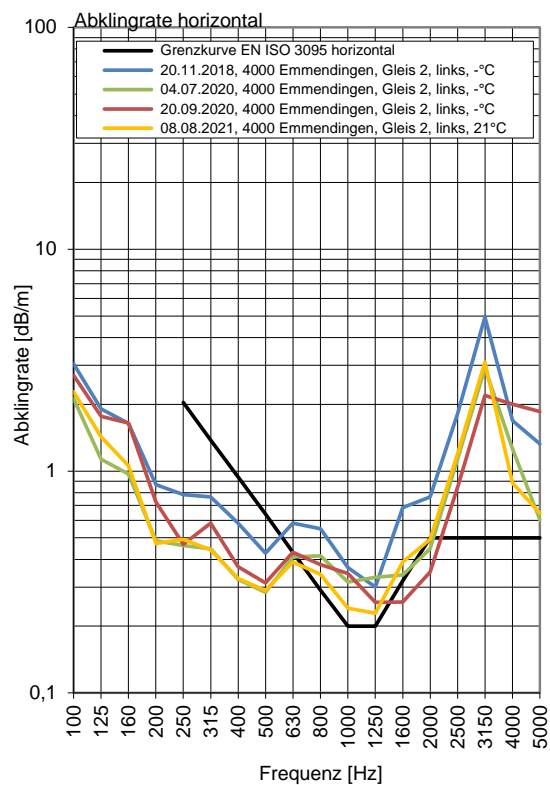
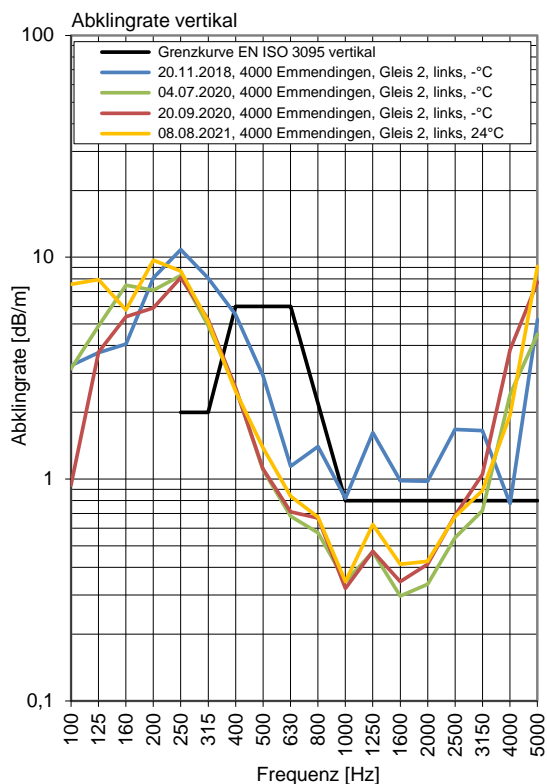
Gleis 2: Richtung Basel

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





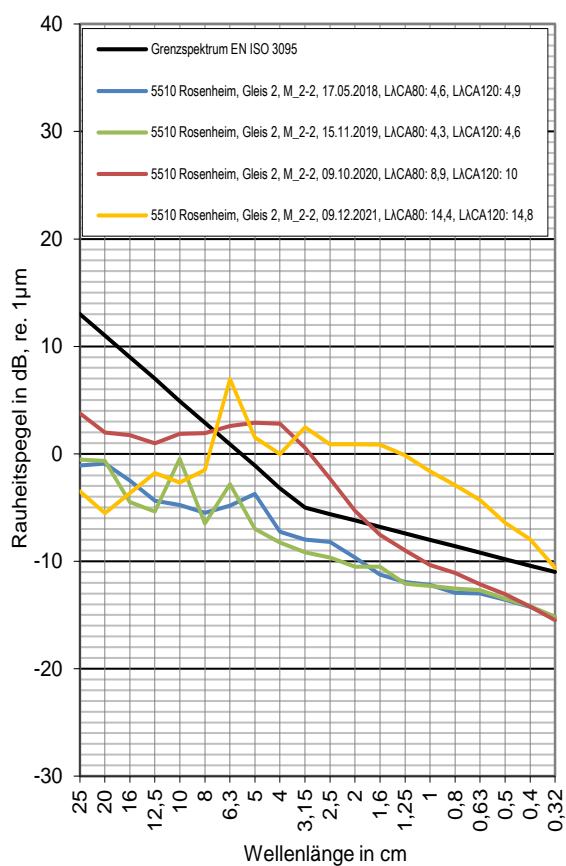
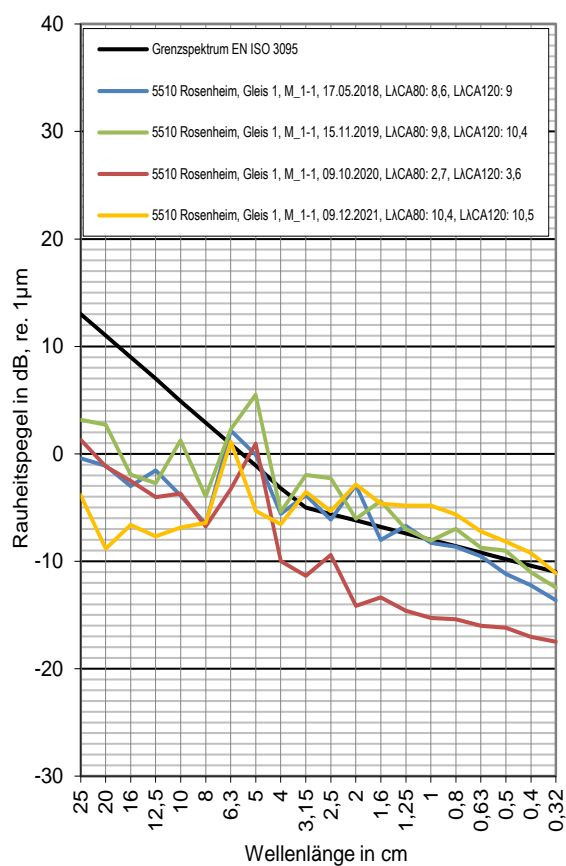
Messstelle Rosenheim

Strecke 5510, km 53,7

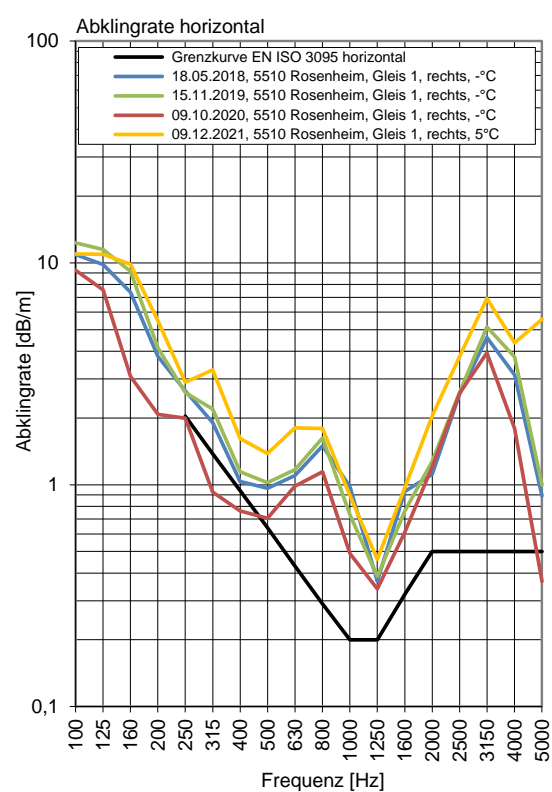
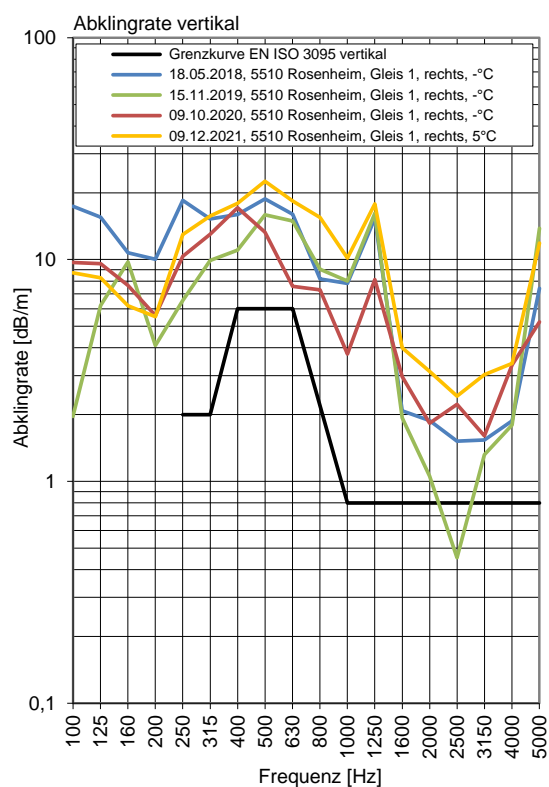
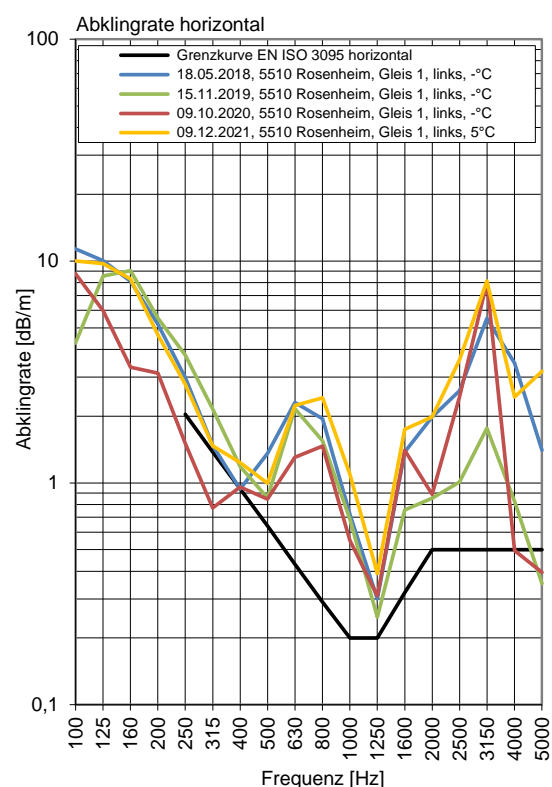
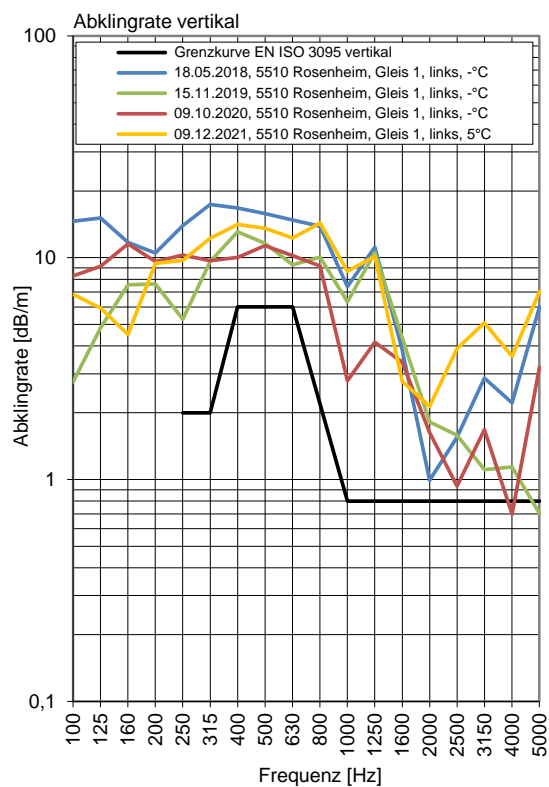
Gleis 1: Richtung Rosenheim

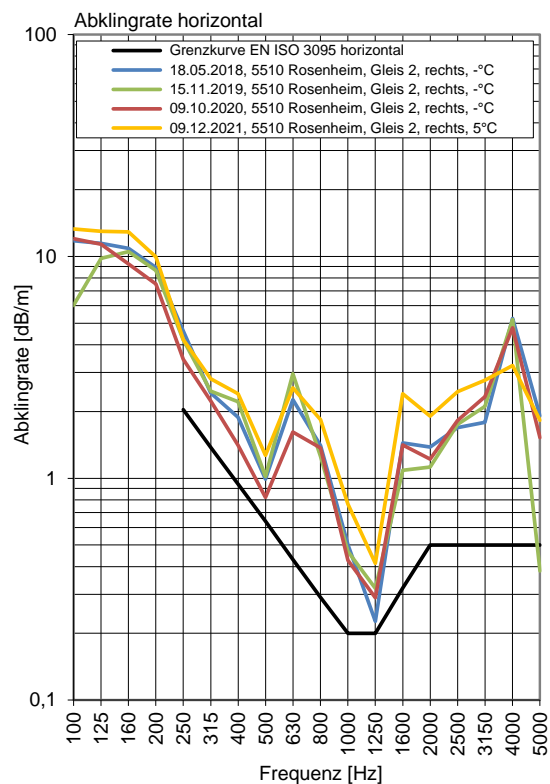
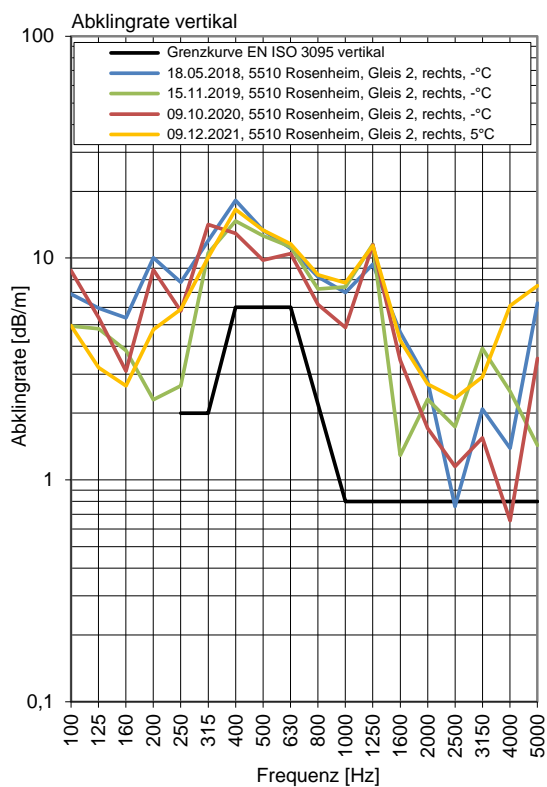
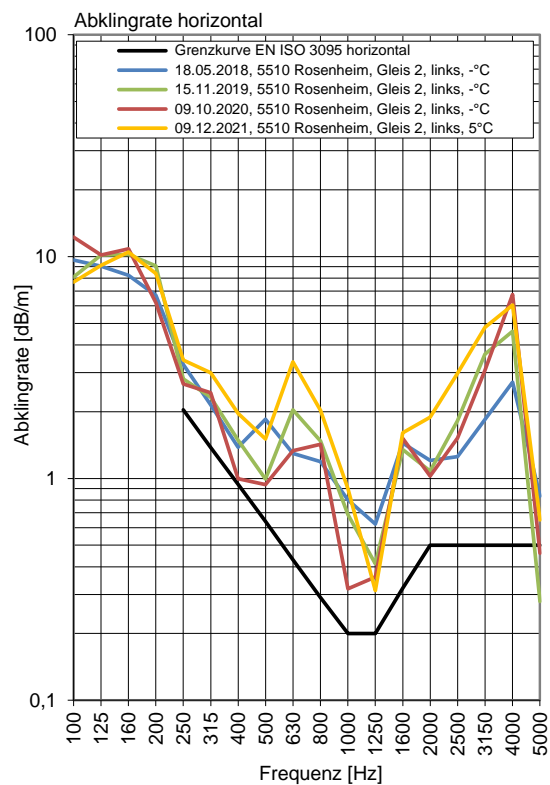
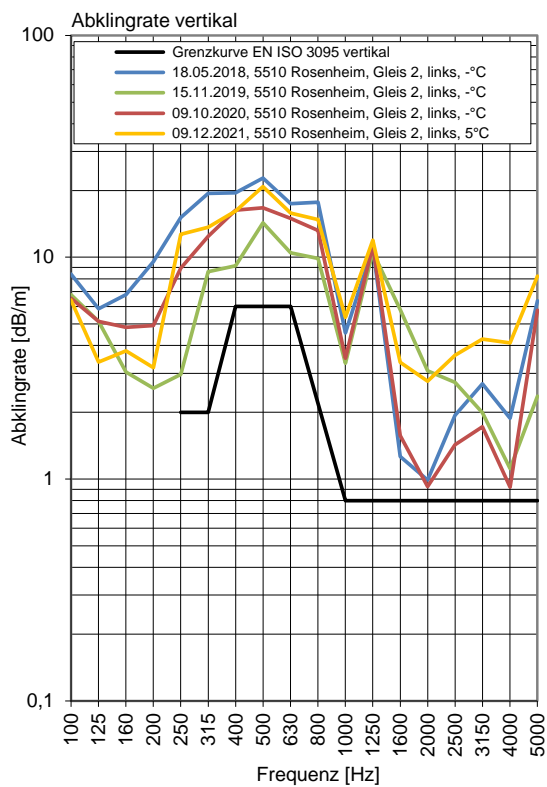
Gleis 2: Richtung München

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





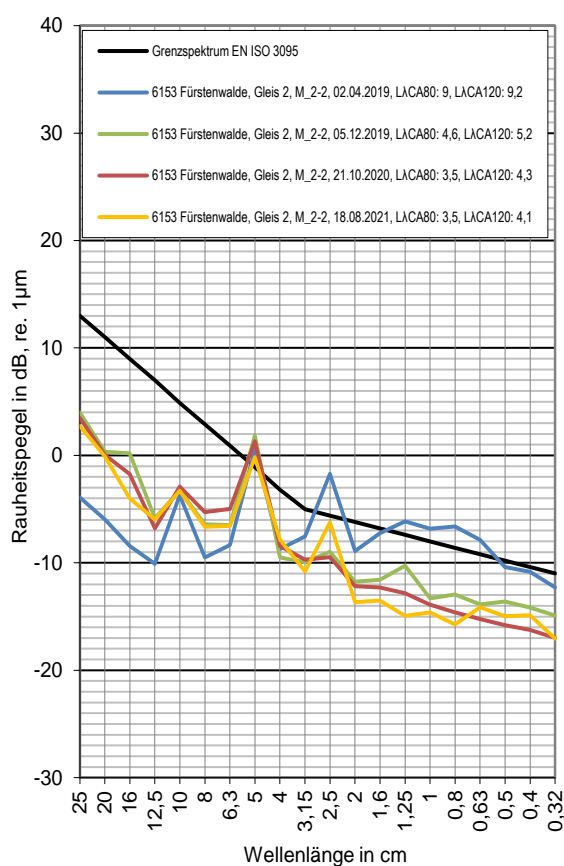
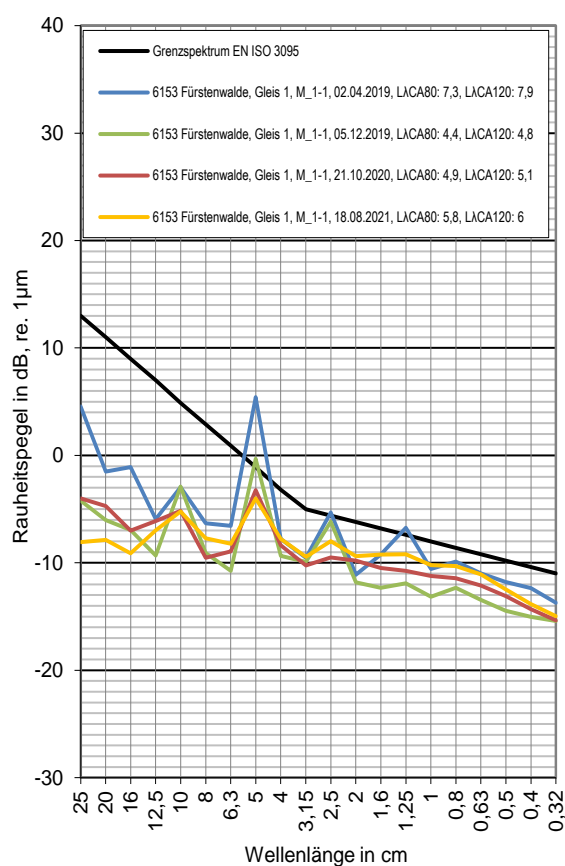
Messstelle Fürstenwalde

Strecke 6153, km 66,9

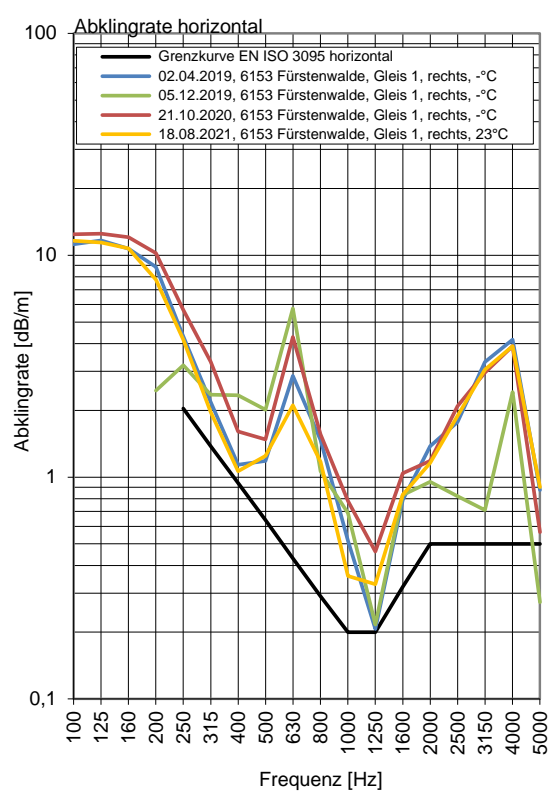
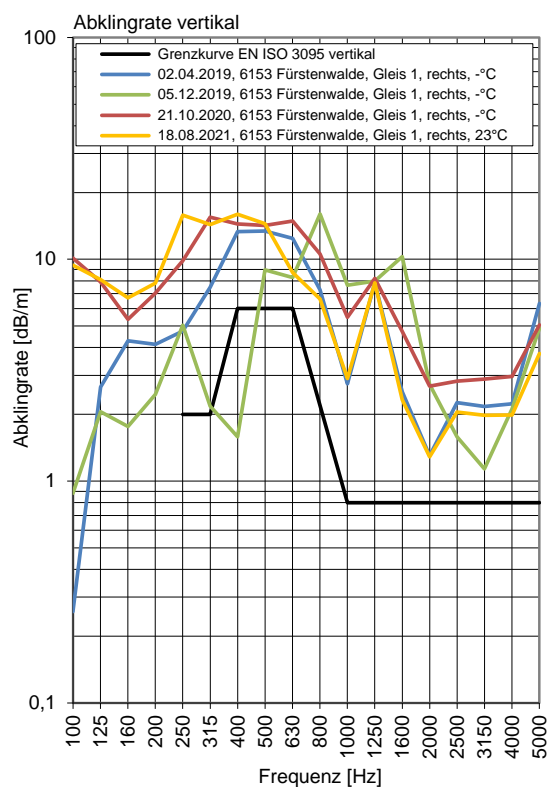
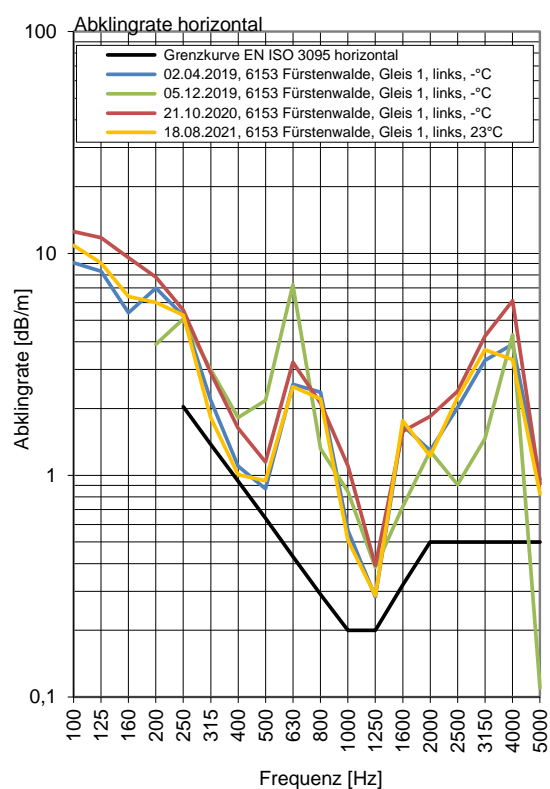
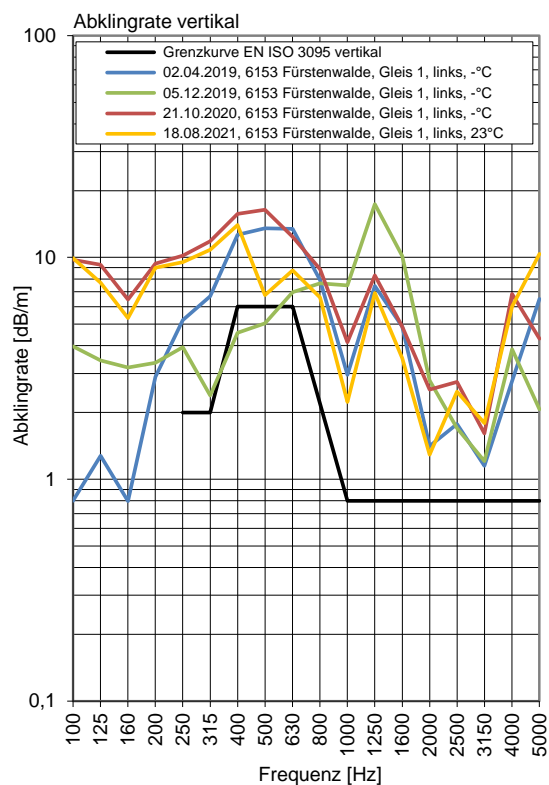
Gleis 1: Richtung Berlin

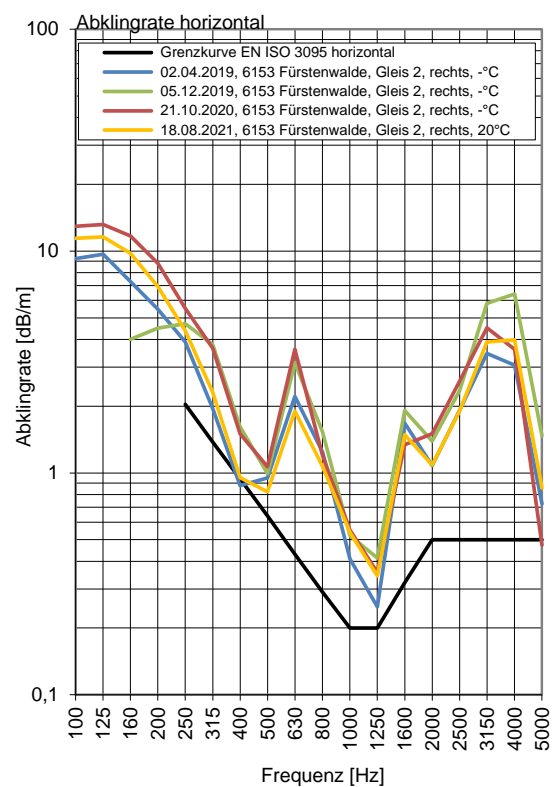
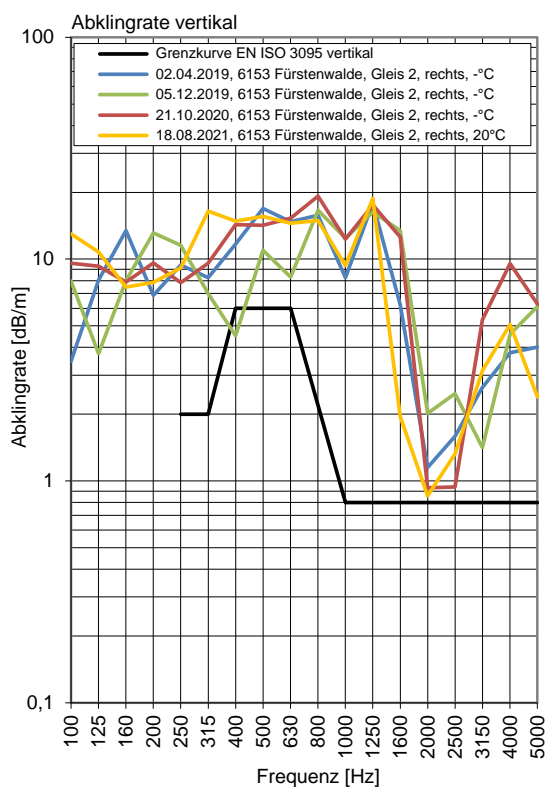
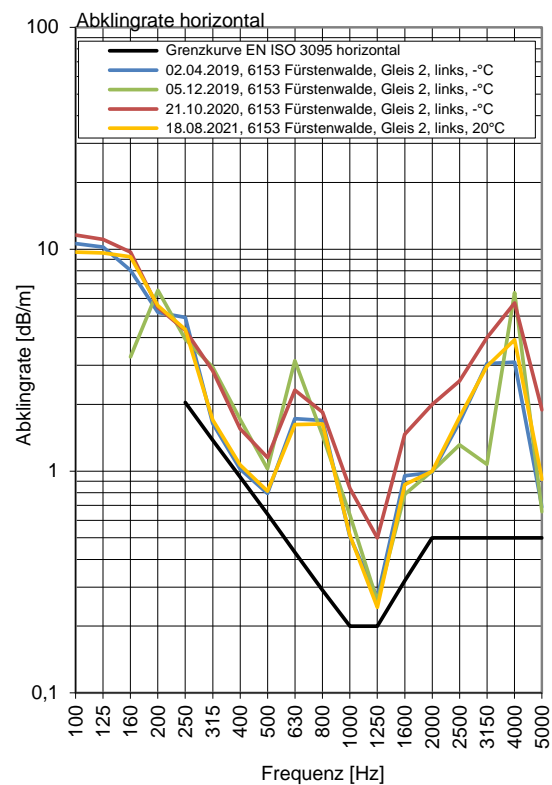
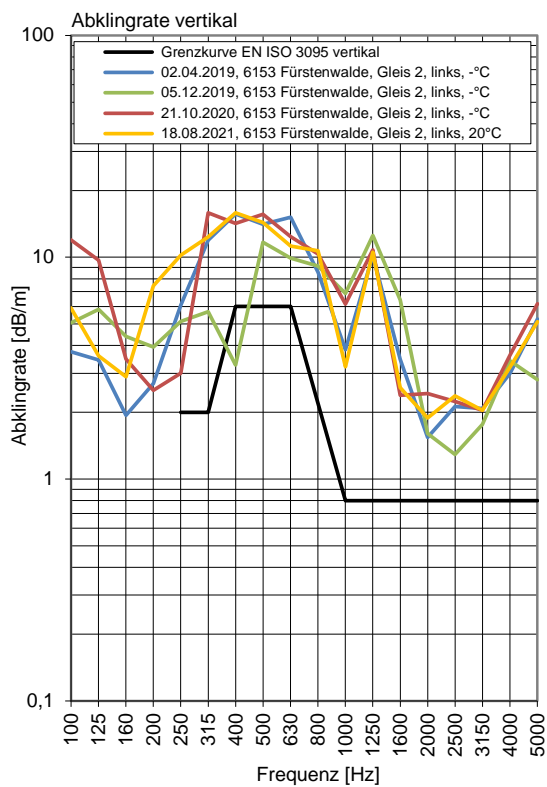
Gleis 2: Richtung Frankfurt/Oder

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





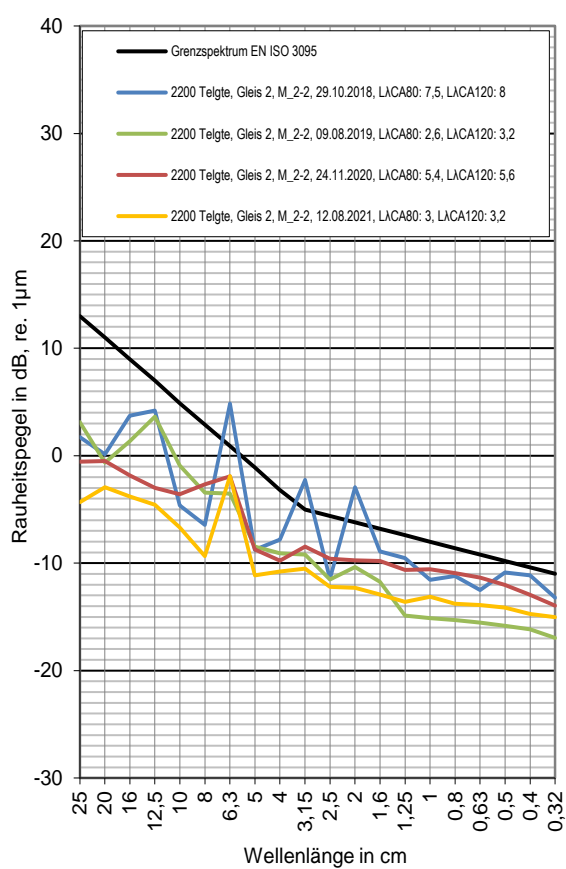
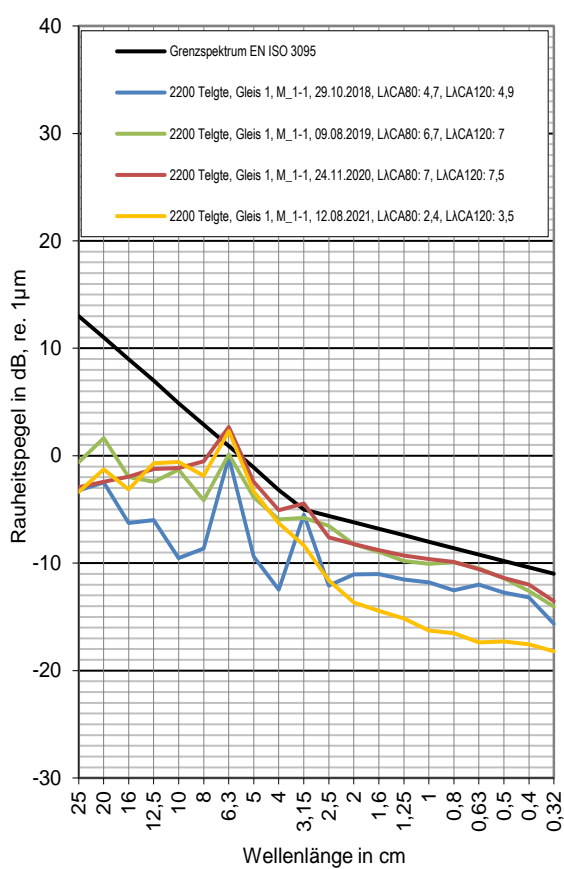
Messstelle Telgte

Strecke 2200, km 82,2

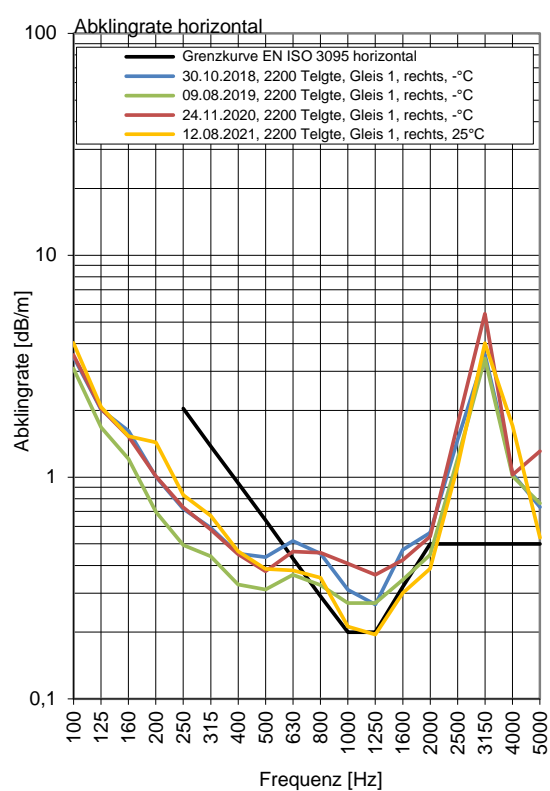
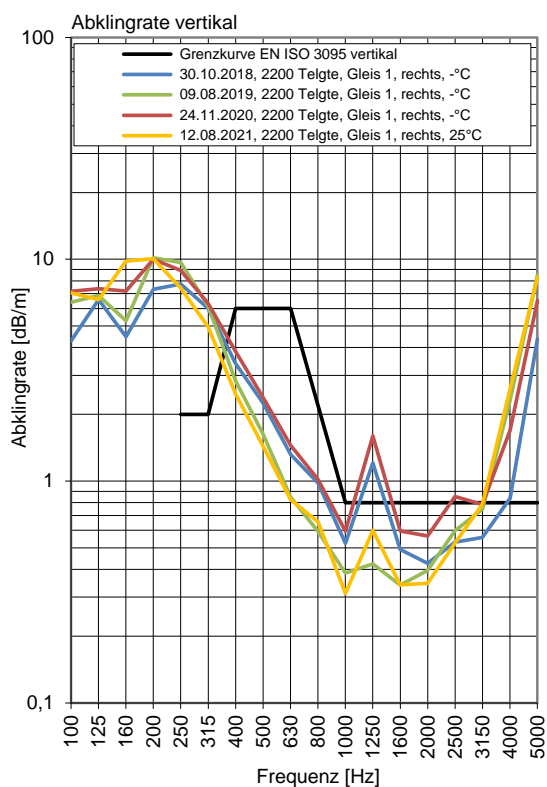
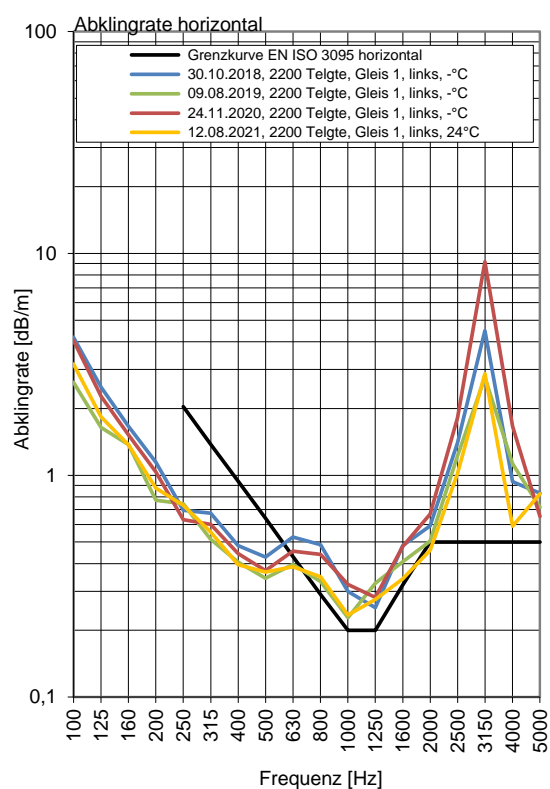
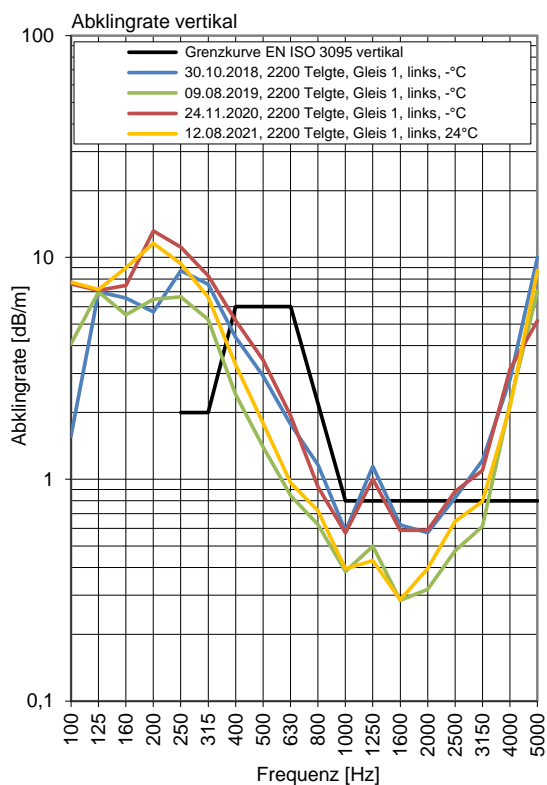
Gleis 1: Richtung Osnabrück

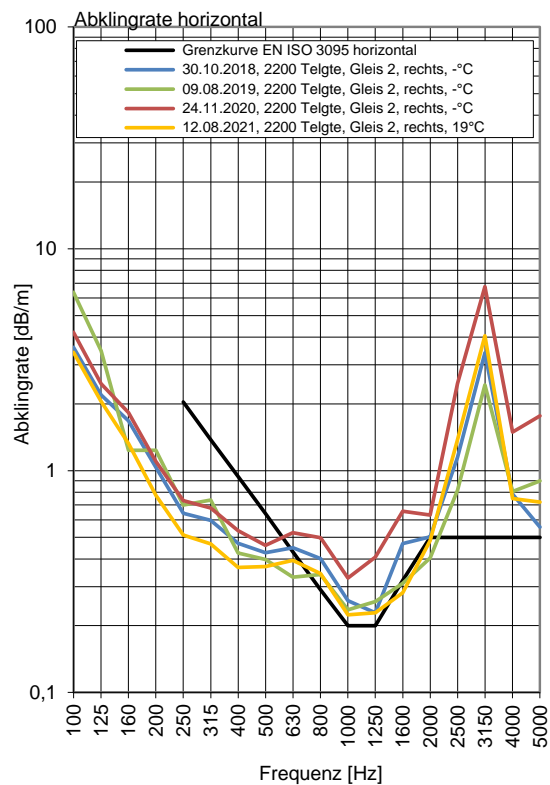
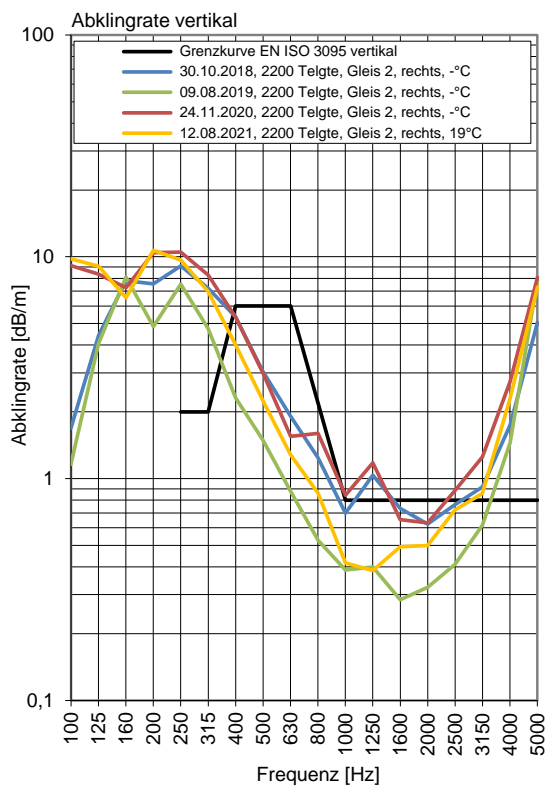
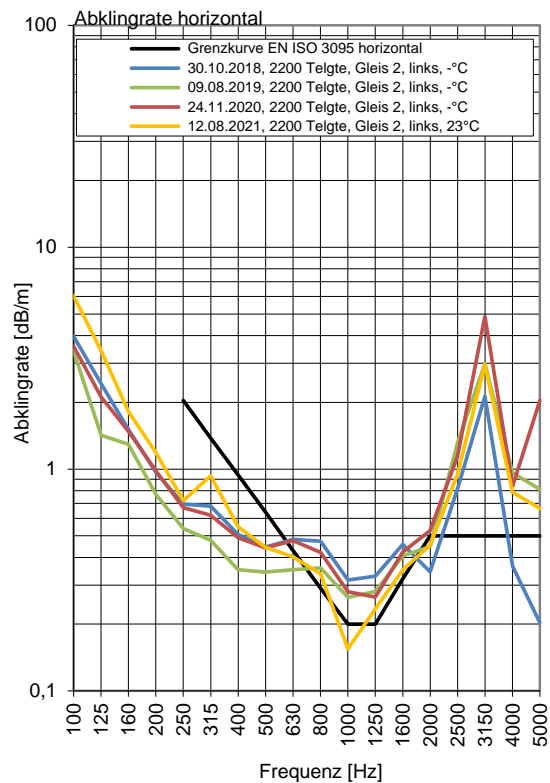
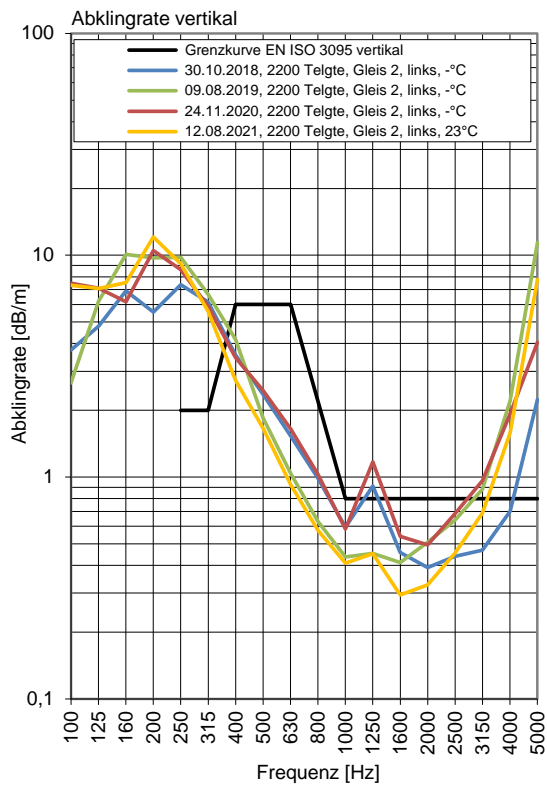
Gleis 2: Richtung Münster

Terzpegelspektrum der Schienenrauheit



Gleisabklingrate





6 Anhang: Literatur

- [1] DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/774 DER KOMMISSION vom 16. Mai 2019 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 in Bezug auf die Anwendung der technischen Spezifikation für Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ auf Bestandsgüterwagen
- [2] E DIN 38452-1:2020-03; Langzeitmessung von Schienenverkehrsgeräuschen – Teil 1: Emissionen; Entwurf März 2020
- [3] DIN EN 15610:2021-11 Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen; Deutsche Fassung EN 15610:2019
- [4] ISO 3095 Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (2013)
- [5] Annemarie van Beek, Edwin Verheijen: Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management Of Environmental Noise - DEFINITION OF TRACK INFLUENCE: ROUGHNESS IN ROLLING NOISE - Deliverable 12 part 1 of the HARMONOISE project
- [6] EN 15461:2011: Bahnanwendungen - Schallemission - Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen; Deutsche Fassung EN 15461:2008+A1:2010
- [7] Lutzenberger, Stiebel, Gerbig, Wettschureck; Luftschall aus dem Schienenverkehr, Fachwissen Technische Akustik, Springer Verlag 2017
- [8] Lutzenberger, Stiebel, Gerbig, Wettschureck; Erschütterungen und sekundärer Luftschall aus dem Schienenverkehr, Fachwissen Technische Akustik, Springer Verlag 2017
- [9] G.J. van Blokland and S. Lutzenberger, "Progress report on measures on rail traffic noise in the EU", Interest Group on Traffic Noise Abatement of the EPA Network (IGNA-EPA), June 2014
- [10] B 126.13 E; Synthesis paper on the EuropeTrain operation with LL brake blocks -
- [11] Lutzenberger, S., Gralla, G.; Ermittlung der Messunsicherheiten bei bahnakustischen Messungen; Erläuterungen zum Anhang F der ISO EN 3095; Fachtagung Bahnakustik 2011.
- [12] Remington, P. J., (1987). Wheel / rail rolling noise. parts I and II. Journal of the Acoustical Society of America, 81 (June), 1805–1832.
- [13] Thompson, D. J., (1993). Wheel–Rail Noise Generation, Parts I – V. Journal of Sound and Vibration, 161, 387–482.
- [14] David Thompson; Railway Noise and Vibration; ISBN: 9780080451473; Elsevier Science; 2008
- [15] Lutzenberger, S.; Gutmann, C.: Geräuschemission europäischer Schienenfahrzeuge, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Januar 2013

- [16] Gutmann, C., Oertli, J., Scossa-Romano, E., Lutzenberger, S., Belcher, D.; Statistische Untersuchung der Track Decay Rate verschiedener Schotteroberbauten im Hinblick auf die Wirksamkeit von Schienendämpfern, Fachtagung Bahnakustik 2014
- [17] Lutzenberger, S.: Bahnlärmmonitoring EI Der Eisenbahningenieur, Mai 2017
- [18] Jahresbericht 2019 – „Monitoring Eisenbahnlärm“ veröffentlicht vom Bundesamt für Verkehr BAV, Schweizerische Eidgenossenschaft
- [19] Jahresbericht 2020 – „Monitoring Eisenbahnlärm“ veröffentlicht vom Bundesamt für Verkehr BAV, Schweizerische Eidgenossenschaft ISO/IEC Guide 98-3 *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurements* (GUM:1995)