

Dynamische Charakterisierung von Schienenbefestigungskomponenten aus polymeren Werkstoffen im Eisenbahnoberbau

Masterarbeit

von

Christian Schneider

erstellt am

**Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe
an der Montanuniversität Leoben**



Betreuung: Dipl.-Ing. Bernd Schrittester, Dipl.-Ing. Herwig Mießbacher
Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter

Leoben, März 2014

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

LEOBEN, März 2014

(Christian Schneider)

DANKSAGUNG

Die vorliegende Masterarbeit wurde am Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe der Montanuniversität Leoben (Leoben, A) unter Beteiligung der Polymer Competence Center Leoben GmbH (Leoben, A) und der Semperit Technische Produkte GmbH (Wimpassing, A) erstellt. Für die Begutachtung meiner Masterarbeit sowie die Begleitung während der Arbeit möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald Pinter, Vorstand des Lehrstuhls für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe der Montanuniversität Leoben herzlich bedanken.

Der Firma Semperit Technische Produkte GmbH (STP) danke ich sehr herzlich für die Bereitstellung der Prüfplatten sowie für die tatkräftige Unterstützung bei der Beschaffung des Prüfstandes und weiterer benötigter Materialien. Für die ausgezeichnete Betreuung seitens der STP und die Einbringung des exzellenten Fachwissens möchte ich mich im Besonderen bei Dipl.-Ing. Herwig Mießbacher und Dipl.-Ing. Wolfgang Fidi bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Dipl.-Ing. Bernd Schrittmesser von der Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL) sowie Jürgen Föttinger von der Montanuniversität Leoben (MUL), die mir diese Masterarbeit ermöglicht haben und mir während meiner gesamten Arbeitsdauer bei der Planung, der praktischen Durchführung sowie der Verfassung meiner Masterarbeit stets zur Seite standen. Ihrer Hilfe und ihrem Fachwissen verdanke ich eine fachlich korrekte und unkomplizierte Abwicklung der Arbeit.

Weiters möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, im Besonderen bei Stephan Hinterdorfer, Ivaylo Mitev, Jürgen Grosser und Dipl.-Ing. Steffen Stelzer, sowie den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau bedanken, durch deren tatkräftige Unterstützung auftretende Probleme immer schnell gelöst werden konnten.

Abschließend darf ich mich noch bei meinen Eltern, Geschwistern und meiner Lebenspartnerin bedanken, die mir während meiner gesamten Studienzeit zur Seite standen und mich immer wieder motiviert haben mein Studium abzuschließen.

KURZFASSUNG

Seit mehr als 30 Jahren werden im Eisenbahnoberbau Elastomere in unterschiedlichen Varianten eingesetzt. Um die unterschiedlichsten Anforderungen an Steifigkeit, Dämpfungsverhalten und Oberflächenreibung der Schienenzwischenlagen zu überprüfen, wurde vor einigen Jahren die EN 13146 entwickelt, die alle Informationen zur Charakterisierung von Schienenzwischenlagen beinhaltet.

Davon ausgehend wurde im Zuge dieser Masterarbeit der in der Norm geforderte Prüfaufbau zur Bestimmung der statischen und der niederfrequenten Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen im unverbauten Zustand sowohl für das Bauteilprüffeld als auch für eine servo-hydraulische Prüfmaschine der Fa. MTS Systems GmbH adaptiert. Zur Implementierung des Versuches wurden von Semperit Technische Produkte GmbH dreizehn verschiedene Elastomerplatten unterschiedlicher Steifigkeiten zur Verfügung gestellt. Aus den gemessenen Einsenkungen an der Schienenzwischenlage und den ermittelten Kraft-Verformungskurven wurden aussagekräftige Werte für die statischen und dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten errechnet. Auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde überprüft und, mit Abweichungen von $< 5\%$ der einzelnen Platten zueinander, bestätigt.

Des Weiteren wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein Prüfaufbau entwickelt mit dem Schienenzwischenlagen im verbauten Zustand zur Simulation von Bogenfahrten geprüft werden können. Dieser sollte einerseits flexibel genug sein um die verschiedenen Winkel und die Austauschbarkeit einiger Elemente zu gewährleisten, andererseits eine hohe Steifigkeit aufweisen um Belastungen von bis zu 120 kN aufnehmen zu können. Die auftretenden Querkräfte auf den Hydropulser mussten abgefangen werden, was mit Hilfe eines Querträgers umgesetzt wurde. Um trotzdem die nötige Flexibilität zu erhalten wurde ein bewegliches Adapterstück entwickelt, das die Bewegungen der einsinkenden Schienenzwischenlage und in weiterer Folge der Schiene ausgleichen konnte.

Für die Bestimmung des Durchschubwiderstandes der Schiene in Längsrichtung wurde die Schwelle inklusive Schienenzwischenlage, Schiene und Befestigungssystem um 90° zur Seite gekippt und mit Halterungen aus Holz fixiert. Das Aufbringen der Kraft erfolgte auf Druck bis ein Durchrutschen der Schiene einsetzte.

Bei der Bestimmung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems wurde die Schwelle samt Befestigungssystem wieder zurückgedreht und ein Distanzstück zum

Ausgleich der Vorneigung eingelegt. Die Auswertung hat gezeigt, dass bei der Durchführung des Versuches besonders auf die Platzierung der Wegaufnehmer geachtet werden muss.

Zur Durchführung des Dauerschwingversuches wurde das gesamte System auf 33° schrägestellt und dynamisch belastet. Bei der Auswertung des ersten Versuches wurde festgestellt, dass der am Prüfstand montierte Querträger nicht geeignet war und durch einen am Prüffeldrahmen montierten Querträger ersetzt werden musste.

Der zweite Versuch zeigte, dass die gemessenen Einsenkungen deutlich höher und die eingeleiteten Kräfte einen Einfluss sowohl auf den Sekantenmodul als auch auf den dynamischen Modul haben. Dieser Einfluss zeigte sich auch an der Schienenzwischenlage direkt, die nach dem zweiten Versuch einen starken Verschleiß aufwies.

ABSTRACT

Since more than 30 years elastomers are used in different types in the railway superstructure. To check the varied requirements of stiffness, damping behavior and surface friction of the rail pads, the EN 13146 was developed a few years ago, which contains all information on the characterization of rail pads.

Based on this information, a standard test setup for determining the static and low-frequency stiffness of rail pads in disassembled condition was adapted for the test field as well as for a servo-hydraulic testing machine manufactured by MTS Systems GmbH. To implement the experiment Semperit Technische Produkte GmbH provided thirteen different elastomer pads of different stiffnesses. To determine this stiffness, the force - deformation curves of the individual pads were evaluated and the stiffness was computed as a dynamic module between two defined force limits. The reproducibility of the results was checked and confirmed with variations $< 5 \%$ of the individual pads to each other.

Furthermore, in the context of this thesis a test bench for testing the rail pads in the fully assembled state was developed, to simulate driving through curves. On the one hand it should be flexible enough to provide the different angles and the interchangeability of certain elements. On the other hand, a high stiffness of the test bench was required to carry loads of up to 120 kN. The transverse forces on the hydropulser had to be intercepted, which could be realized with the help of a crossbeam. To obtain the flexibility a portable adapter piece was developed, which could compensate the movements of the rail pad and subsequently the rail.

For the determination of the slipping resistance of the rail in longitudinal direction the sleeper including liner and rail fastening system was tilted by 90° to the side and fixed to supports made of wood. The force in pressure mode was increased until the rail slipped through the fastening system. The obtained values agreed generally very well with those of the alternative testing institute.

In determining the static stiffness of the fastening system the sleeper together with the fastening system was turned back again, and a spacer to compensate the pretilt was inserted. The evaluation showed that attention must be paid to the placement of the displacement transducers in the tests.

To carry out the fatigue test, the entire system was tilted to 33 ° and loaded dynamically. The evaluation of the first experiment showed, that the crossbeam mounted on the test bench was not suitable and had to be replaced by a crossbeam mounted on the frame of the test field.

The second experiment showed that the measured displacements were significantly higher and approximately in the same range as the measured values of the alternative testing institute and that the introduced forces had an impact on the secant modulus and the dynamic modulus. This influence also appeared in the rail pad directly, which had a high wear after the second attempt.

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	1
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	5
2 GRUNDLAGEN	7
2.1 Kautschuk	7
2.2 Füllstoffe	9
2.3 Vernetzungsmittel	10
2.4 Dynamische Eigenschaften von Elastomeren.....	11
2.5 Elastomere im Eisenbahnoberbau	16
2.6 Ermittlung der Eigenschaften von Schienenzwischenlagen nach EN 13146.....	21
3 EXPERIMENTELLES	36
3.1 Untersucher Werkstoff	36
3.2 Verwendete Prüfkörper	36
3.3 Verwendete Prüfmaschinen und Messsysteme	38
3.4 Methodenentwicklung	41
3.5 Adaptierungen aufgrund auftretender Probleme.....	50
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	56
4.1 Ergebnisse aus der Bestimmung der Steifigkeiten am Bauteilprüffeld	56
4.2 Vergleichsmessungen an einer servo-hydraulischen Prüfmaschine.....	61
4.3 Verifizierung der Ergebnisse	66
4.4 Erster Versuchablauf nach EN 13146.....	68
4.5 Zweiter Versuch nach EN 13146	77
5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	85
6 AUSBLICK.....	88
7 LITERATURVERZEICHNIS	89

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1:	Schematische Darstellung der Wirkung von verstärkenden und nicht-verstärkenden Eigenschaften auf ausgesuchte Eigenschaften eines Kautschuks (Röthemeyer & Sommer, 2006).....	10
Abb. 2.2:	Schematische Darstellung unterschiedlicher Schwefelbrücken bei der Vernetzung (Röthemeyer & Sommer, 2006).	11
Abb. 2.3:	Schematische Darstellung der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung.....	12
Abb. 2.4:	Darstellung des gleich- und gegenphasigen Modul-Anteils in der Gauß'schen Zahlenebene.....	13
Abb. 2.5:	Schematische Darstellung einer Hysterese-Schleife in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm für ungefüllte Elastomere.....	14
Abb. 2.6:	Schematische Darstellung des Mullins-Effekts.	15
Abb. 2.7:	Schematische Darstellung der Steifigkeitsabnahme bei Erhöhung der Amplitude (Payne Effekt).....	15
Abb. 2.8:	Modell für die amplitudenabhängige Viskoelastizität in Anlehnung an Payne (Grambow, 2003).....	16
Abb. 2.9:	Wirkorte von Schwingungsmechanismen sowie deren Wechselwirkungen a) aktive Maßnahmen an der Quelle, b) passive Maßnahmen am Übertragungsweg, c) passive Maßnahmen am Immisionsort.....	18
Abb. 2.10:	Schematische Darstellung von Schienendämpfungen.....	19
Abb. 2.11:	Schematische Darstellung eines Masse-Feder-Systems auf Einzellagern (ÖBB-Infrastruktur AG, 2013).	19
Abb. 2.12:	Beispielhafte Anordnung von Unterschottermatten (Getzner Werkstoffe GmbH, 2013).	20
Abb. 2.13:	Schematische Darstellung einer Schwellenbesohlung.....	20
Abb. 2.14:	Schematische Darstellung einer elastischen Schienenzwischenlage.	21
Abb. 2.15:	Prüfaufbau zur Bestimmung von statischen und dynamischen Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen.	23
Abb. 2.16:	Darstellung einer Kraft-Verformungskurve zur Auswertung der statischen Steifigkeit k_{SP}	24
Abb. 2.17:	Darstellung einer Kraft-Verformungskurve zur Auswertung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit k_{LFP}	26
Abb. 2.18:	Prüfaufbau zur Bestimmung der statischen Steifigkeit am gesamten Schienenbefestigungssystem.	27

Abb. 2.19:	Darstellung der Anbringung von 4 Wegaufnehmern zur Messung der Einsenkungen (EN 13146, 2012).....	27
Abb. 2.20:	Darstellung einer Kraft-Verformungskurve zur Ermittlung der statischen Steifigkeit des gesamten Schienenbefestigungssystems k_{SA}	28
Abb. 2.21:	Schematische Prüfanordnung zur Ermittlung des Durchschubwiderstandes (EN 13146, 2012).....	29
Abb. 2.22:	Kraft-Verformungskurve zur Auswertung des Durchschubwiderstandes (EN 13146, 2012).	30
Abb. 2.23:	Prüfaufbau zur Bestimmung der Spannkraft.....	31
Abb. 2.24:	Prüfanordnung für die Verwendung einer Schiene im Schrägaufbau (EN 13146, 2012).	32
Abb. 2.25:	Prüfanordnung für die Verwendung von 2 Schienen in Scherenanordnung (EN 13146, 2012).....	33
Abb. 2.26:	Anordnung der Krafteinleitung und Darstellung des Abstandes X vom Krümmungsmittelpunkt der Fahrkante (EN 13146, 2012).	34
Abb. 2.27:	Darstellung der Anbringung von 6 Wegaufnehmern zur Messung der Schienenneigung und der Einsenkungen (EN 13146, 2012).	35
Abb. 3.1:	Darstellung der ZW 700 mit den grundlegenden Abmessungen.....	37
Abb. 3.2:	Darstellung der W 15126 mit den grundlegenden Abmessungen.....	37
Abb. 3.3:	Darstellung der W 12790 mit den grundlegenden Abmessungen.....	38
Abb. 3.4:	Bauteilprüffeld mit luftgefederter Grundplatte, Stahlrahmen und Pulsator...39	
Abb. 3.5:	Servohydraulische Prüfmaschine mit eingebautem Prüfkörper und externem Messsystem.	40
Abb. 3.6:	Abmessungen eines induktiven Wegaufnehmers (HBM GmbH, 2013).	40
Abb. 3.7:	Konstruktionsdarstellung der Krafteinleitung für die Bestimmung der Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen.	41
Abb. 3.8:	Erstes Konzept des Prüfstandes zur Durchführung des Dauerschwingversuches nach EN 13146.....	43
Abb. 3.9:	Konzept für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes am Prüfstand.	43
Abb. 3.10:	Freigeschnittener Träger für die mechanische Auslegung.	44
Abb. 3.11:	Konstruktion des Prüfstandes inklusive Querträger.....	47
Abb. 3.12:	Adapterstück für Krafteinleitung mit Schwalbenschwanzführung.	48
Abb. 3.13:	Stempelverlängerung und Adapterstück für Krafteinleitung bei Durchschubwiderstand und statischer Steifigkeit des Befestigungssystems.	48
Abb. 3.14:	Simulationsergebnis der Vergleichsspannung nach Mises am Prüfstand.	49
Abb. 3.15:	Schematische Darstellung der Signalaufbereitung von LVDT´s.....	50

Abb. 3.16:	Konstruktive Lösung der LVDT-Halterung.	51
Abb. 3.17:	Prüfanordnung zur Ermittlung des Durchschubwiderstandes.	51
Abb. 3.18:	Messung der Stempelverschiebung in alle 3 Raumrichtungen.....	53
Abb. 3.19:	Darstellung der Bewegung des Prüfstandes bei dynamischer Belastung.....	54
Abb. 3.20:	Anordnung der LVDT´s zur Messung der Bewegung des Prüfstandes.	54
Abb. 3.21:	Anordnung und Form der zusätzlichen Bolzenabstützung am Prüfstand.....	55
Abb. 3.22:	Konstruktionszeichnung des neuen Querträgers sowie Anordnung der Kraftmessdose und der neuen Krafteinleitung.	55
Abb. 4.1:	Darstellung des Prüfaufbaus am Prüffeld zur Ermittlung der Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen.	57
Abb. 4.2:	Kraft-Verformungskurven zur Ermittlung der statischen Steifigkeit der ZW 700.	58
Abb. 4.3:	Kraft-Verformungskurven zur Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700.	59
Abb. 4.4:	Darstellung der Messverzögerung beim Vergleich externe / interne Sensoren.....	60
Abb. 4.5:	Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700 nach Berücksichtigung der Messverzögerung.	61
Abb. 4.6:	Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der statischen Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322.....	62
Abb. 4.7:	Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322.	63
Abb. 4.8:	Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der statischen Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322 nach Minimierung des Rauschens.....	64
Abb. 4.9:	Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322 nach Minimierung des Rauschens.....	64
Abb. 4.10:	Vergleich der Steifigkeiten aller ZW 900 Prüfplatten inklusive Abweichungen.	65
Abb. 4.11:	Vergleich der Steifigkeiten der ZW 900 - Probe 1 inklusive Abweichungen. .	66
Abb. 4.12:	Vergleich der statischen Steifigkeiten zwischen MUL und STP an ausgewählten Zwischenlagen.....	67
Abb. 4.13:	Vergleich der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten zwischen MUL und API an ZW 700 – Probe 2.	68
Abb. 4.14:	Anordnung der LVDT´s für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes.....	69
Abb. 4.15:	Ermittlung des Durchschubwiderstandes am 3. Zyklus.....	70

Abb. 4.16:	Vergleich der 3 Zyklen bei Ermittlung des Durchschubwiderstandes.	70
Abb. 4.17:	Prüfaufbau für Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems.	71
Abb. 4.18:	Vergleich der Einsenkungen der 4 LVDT´s bei der Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems.	72
Abb. 4.19:	Anordnung der für den Dauerschwingversuch erforderlichen 8 LVDT´s.	73
Abb. 4.20:	Darstellung der Signale von LVDT 1 bis 4 inklusive Vor- und Nacheichung. .	73
Abb. 4.21:	Darstellung der Signale von LVDT 5 bis 8 inklusive Vor- und Nacheichung. .	74
Abb. 4.22:	Prüfplatte ZW 700 - Probe 1 nach dem Dauerschwingversuch.....	74
Abb. 4.23:	Vergleich der Einsenkungen der 4 LVDT´s bei der Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems nach dem Dauerschwingversuch.....	75
Abb. 4.24:	Vergleich der Durchschubwiderstände.	77
Abb. 4.25:	Kraft-Verformungskurve eines LVDT über den gesamten Belastungsverlauf.	78
Abb. 4.26:	Vergleich der Einsenkungen der 4 LVDT´s bei der Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems.	79
Abb. 4.27:	Detailaufnahme des Prüfaufbaus bei Versuchsabbruch nach rund 1,3 Mio. Zyklen.	80
Abb. 4.28:	Darstellung der Signale von LVDT 1 bis 4 inklusive statischer Vor- und Nacheichung.....	80
Abb. 4.29:	Darstellung der Signale von LVDT 5 bis 8 inklusive statischer Vor- und Nacheichung.....	81
Abb. 4.30:	Schädigung der Winkelführungsplatte durch fehlerhafte Krafteinleitung.....	81
Abb. 4.31:	Veränderung des dynamischen Moduls am Beispiel von LVDT 1.....	82
Abb. 4.32:	Veränderung des Sekantenmoduls am Beispiel von LVDT 3.	82
Abb. 4.33:	Änderung des dynamischen Moduls und des Sekantenmoduls über die Zykluszahl.	83
Abb. 4.34:	Zusätzliche Prüfplatte ZW 700 nach dem abgebrochenen Dauerschwingversuch.	83

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Seit annähernd 200 Jahren bewegen sich Züge mit steigenden Geschwindigkeiten entlang immer ausgereifterer Schienensysteme. Probleme bereiten hierbei neben den höheren Geschwindigkeiten auch die immer größere Lärmbelastigung für Anrainer. Fast die Hälfte aller in Österreich lebenden Personen fühlt sich durch Lärm belästigt. Hauptursache für die Lärmbelastigung ist nach wie vor der Verkehr (Statistik Austria, 2011). Laut einer Statistik des deutschen Umweltbundesamtes fühlten sich Mitte der 1980er Jahre knapp 17 % der Bürgerinnen und Bürger durch die Bahn belästigt (Umweltbundesamt, 1986/87). Um dem damaligen Trend einer steigenden Belästigung durch die Bahn entgegenzuwirken und um den immer strengeren gesetzlichen Auflagen gerecht zu werden, entwickelte man zahlreiche Schutzmaßnahmen um eine Ausbreitung der durch Rad und Schiene entstehenden Schwingungen zu reduzieren (Engst, 1992).

Dies gelang vor allem durch den Einsatz von Elastomeren in unterschiedlichen Bereichen im Eisenbahnoberbau. So werden seit einigen Jahren beim Gleisbau zwischen Betonschwelle und Schiene sogenannte Schienenzwischenlagen aus Elastomeren verbaut, die viele Vorteile für Bahn und Umwelt mit sich bringen. Beispielsweise können durch den Einsatz dieser Schienenzwischenlagen Geräuschemissionen sowie Vibrationen eines vorbeifahrenden Zuges minimiert werden. Dadurch wird das Material geschont und angrenzende Bewohner sind einer geringeren Lärmbelastung ausgesetzt. Gleichzeitig tragen die Schienenzwischenlagen auch zur Sicherheit der Passagiere bei, da – aufgrund der Isolation der Schienen gegenüber der Schwelle und in weiterer Folge gegenüber dem Erdreich – elektrische Signale durch die Schienen geschickt werden können und somit dem Fahrdienstleiter Aufschluss geben, ob sich ein Zug auf dem ihm zugewiesenen Streckenabschnitt befindet.

Aus diesem Grund müssen die Zwischenlagen unterschiedlichste Anforderungen an Steifigkeit, Dämpfungsverhalten und Oberflächenhaftung erfüllen. Um diesen Anforderungen nachzukommen, wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein Prüfaufbau zur Simulation von Bogenfahrten entwickelt, mit dem Schienenzwischenlagen im komplett verbauten Zustand an der Betonschwelle geprüft werden können (Schneider & Pompenig, 2013). Grundlage für den Bau dieses Prüfstandes war die EN 13146, die alle Informationen zur Charakterisierung von Schienenzwischenlagen beinhaltet.

Weiters sollte im Zuge dieser Masterarbeit die Bestimmung der statischen und der niederfrequenten Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen im unverbauten Zustand mit Hilfe einer servo-hydraulischen Prüfmaschine implementiert und verifiziert werden.

2 GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden Elastomere generell sowie der Einsatz und die Prüfung von Elastomeren im Eisenbahnoberbau beschrieben. Beginnend mit einem allgemeinen Teil und den dynamischen Eigenschaften von Elastomeren wird der Bogen über die geschichtliche Entwicklung und die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten bis hin zur Prüfung der Eigenschaften von Schienenzwischenlagen nach EN 13146 gespannt.

2.1 Kautschuk

Kautschuk ist bereits seit Kolumbus' Zeiten bekannt. Er berichtete von südamerikanischen Ureinwohnern, die mit der Milch eines Baumes einen elastischen Ball herstellten. Dieser Baum wurde von den Eingeborenen Ca-o-chu genannt, was soviel bedeutet wie „trägender Baum“. Daraus entwickelte sich das Wort Kautschuk, unter dem man heute ein vernetzbares Polymer versteht, dessen Glasübergangsbereich weit unter dem Gefrierpunkt liegt (Gohl, 1983; Röthemeyer & Sommer, 2006). Grundsätzlich können zwei Arten unterschieden werden:

a) Naturkautschuk

Lange Zeit war der Naturkautschuk (NR) die einzige Rohstoffbasis für Elastomere. Auch heute wird Naturkautschuk noch aus der Milch des Kautschuk-Baumes gewonnen, wobei rund ein Fünftel davon Plantagenkautschuk ist und der Rest von Kleinpflanzen erzeugt wird. Im Jahr 2005 wurden etwa 9 Millionen Tonnen Naturkautschuk erzeugt, was mehr als 40 % des weltweiten Kautschukbedarfs ausmacht (Holzner, 2012).

Dieser hohe Anteil am Weltmarkt ist auf die besonders guten Eigenschaften des NR zurückzuführen. Elastomere aus NR weisen bei mechanisch-dynamischer Beanspruchung eine sehr hohe Belastbarkeit auf. Außerdem verfügen sie über hohe Elastizität und Reißfestigkeit sowie gute Abriebbeständigkeit. Mit Hilfe von Ozonschutzmitteln kann die schlechte Witterungsbeständigkeit eliminiert werden. Die dauerhafte Einsatztemperatur liegt bei ca. 80 °C, allerdings sind kurzzeitige Spitzenbelastungen von bis zu 120 °C durchaus möglich.

Einen großen Nachteil hat NR jedoch gegenüber anderen Kautschuken. Die Unbeständigkeit gegen Mineralöle, Treibstoffe und Schmierfette sowie viele Arten von Kohlenwasserstoffen verkleinert seinen Anwendungsbereich drastisch (Gohl, 1983).

b) Synthesekautschuk

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts erkannte man, dass Kautschuk auch synthetisch hergestellt werden kann indem man Kohlenwasserstoffe zu Isopren polymerisiert. Getrieben wurde diese Entwicklung von – auf Grund der Nachfrage aus der Automobilindustrie – immer weiter steigenden Preisen des Naturkautschuks. Sehr bald entwickelte man mit verschiedenen Herstellverfahren immer neue Synthesekautschuke, deren Eigenschaften bald an die des NR heranreichten und diese sogar übertrafen (Röthemeyer & Sommer, 2006).

Heute gibt es eine sehr breite Vielfalt an synthetischen Kautschuken, die mit ihren spezifischen Eigenschaften Einsatz in nahezu allen Anwendungsgebieten finden. Im Folgenden sind die wichtigsten Elastomere und ihre Anwendungsgebiete überblicksmäßig aufgeführt (Gohl, 1983; Röthemeyer & Sommer, 2006):

Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)

Der häufigste Synthesekautschuk ist mit rund 30 % der weltweiten Kautschukherstellung Styrol-Butadien-Kautschuk. Er ist zwar in den meisten Eigenschaften dem NR unterlegen, jedoch wegen seines niedrigen Preises sehr weit verbreitet. Zum Einsatz kommt SBR in Reifen, Dichtungen, Schuhsohlen, Profilen, Schläuchen, Faltenbälgen, Förderbändern, Kabelisolationen und vielem mehr.

Polybutadien (BR)

Polybutadien wird hauptsächlich in Kombination mit NR oder SBR eingesetzt. Der größte Verbraucher ist die Reifenindustrie, aber auch bei Förderbändern, Formartikeln, Gleiskettenpolstern, Laufrollen und Schuhsohlen kommt er zum Einsatz.

Polyisopren (IR)

Auf Grund seiner Ähnlichkeit zum NR wird auch IR hauptsächlich in Kombination mit NR, BR und SBR eingesetzt um die Verarbeitungseigenschaften zu verbessern.

Ethylen-Propylen-Kautschuk (EPM/EPDM)

Die großen Vorteile dieses Kautschuks sind neben seiner herausragenden Ozon- und Witterungsbeständigkeit auch eine höhere Temperatur- und Ölbeständigkeit. Eingesetzt wird EPM/EPDM vor allem im Außenbereich wie z.B. in vielen Bereichen der Automobilindustrie, Fensterdichtungen, Kabelummantelungen, Schläuchen für Waschmaschinen und Förderbändern.

Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR)

Acrylnitril-Butadien-Kautschuk ist sehr gut gegen Mineralöle, Fette und Treibstoffe beständig und besitzt eine hohe Kälteflexibilität und Weiterreißfestigkeit. Daher umfasst das Anwendungsgebiet dieses Kautschuks ölbeständige Formartikel und Dichtungen aller Art, Membranen, Dichtringe, Fördergurte sowie Kraftstoff- und Milchsschläuche.

Chloropren-Kautschuk (CR)

Chloropren-Kautschuk vereinigt viele mittelmäßige Eigenschaften in einem Kautschuk. Solche Eigenschaften sind z.B. ölbeständig für gelegentliche Kontakte, ausreichend ozonbeständig, für viele dynamische Anwendungen ausreichend elastisch, flammwidrig und isolierend gegen elektrischen Strom. Dadurch wird CR für Kabelummantelungen, Achsmanschetten, Keilriemen, Formartikel, Förderbänder, Textilgummierungen und Baudichtungen eingesetzt.

2.2 Füllstoffe

Anfangs noch zur Verminderung der Klebrigkeit eingesetzt wurden Füllstoffe bereits Mitte des 19. Jahrhunderts zum Strecken des Kautschuks bzw. zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit eingesetzt. Zusätzlich entdeckte man bald darauf, dass einige Füllstoffe neben den bisher bekannten Eigenschaften auch verstärkend wirken. Mit der Entwicklung der Mastiziermaschine für die Einmischung von Füllstoffen stand einem großtechnischen Einsatz der Füllstoffe nichts mehr im Weg (Röthemeyer & Sommer, 2006).

Füllstoffe können auf vielerlei Arten eingeteilt werden. Die Einteilungsmethode mit dem höchsten Praxisbezug ist die Unterteilung in aktive und inaktive Füllstoffe (Röthemeyer & Sommer, 2006):

Aktive Füllstoffe

Aktive Füllstoffe sind sogenannte verstärkende Füllstoffe. Sie verändern durch Wechselwirkung mit dem Kautschuk die viskoelastischen Eigenschaften des Elastomers. Außerdem verbessern sie Reißfestigkeit, Weiterreißwiderstand und Abrieb und erhöhen gleichzeitig die Viskosität. Die Partikelgröße dieser Füllstoffe liegt bei etwa 10 bis 100 nm.

Inaktive Füllstoffe

Inaktive Füllstoffe werden auch als nicht-verstärkende Füllstoffe bezeichnet und hauptsächlich zum Verdünnen der Elastomermatrix eingesetzt. Sie verbessern einerseits Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit und Gasdurchlässigkeit, andererseits vermindern sie

sogar einige Eigenschaften wie z.B. die Bruchenergie. Die Partikeldurchmesser liegen hier mit 500 bis 1000 nm deutlich über denen der aktiven Füllstoffe.

Der Einfluss verstärkender und nicht-verstärkender Füllstoffe auf ausgewählte Eigenschaften ist in Abb. 2.1 dargestellt. Eine klare Trennung der beiden Füllstoffarten ist aber nicht immer möglich, da viele Füllstoffe nur mittelmäßige Eigenschaftsveränderungen aufweisen (Nagadi, 1993; Röthemeyer & Sommer, 2006).

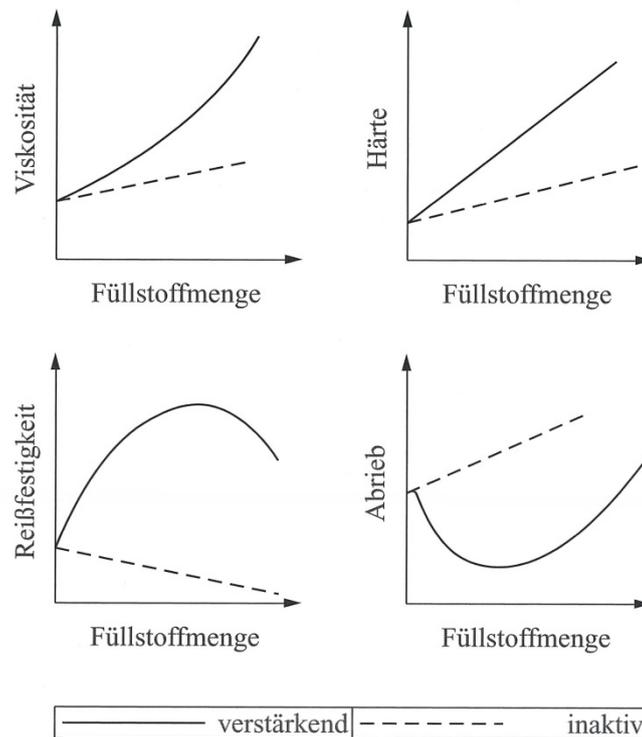


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Wirkung von verstärkenden und nicht-verstärkenden Eigenschaften auf ausgesuchte Eigenschaften eines Kautschuks (Röthemeyer & Sommer, 2006).

2.3 Vernetzungsmittel

Bei der sogenannten Vernetzungsreaktion – oder auch Vulkanisation – wird der Kautschuk weitmaschig vernetzt und es erfolgt eine Umwandlung zum Gummi. Dadurch erhalten Kautschuke ihre spezifischen Eigenschaften wobei z.B. Hysterese und Dämpfung mit zunehmender Vernetzungsdichte abnehmen, im Gegenzug dazu aber E-Modul und Elastizität zunehmen. Zu beachten ist auch, dass einige Eigenschaften wie Weiterreißwiderstand und Zugfestigkeit ein Maximum durchlaufen während andere (z.B. Gasdurchlässigkeit) keinerlei Änderung erfahren (Röthemeyer & Sommer, 2006).

Die Auswahl des Kautschuks und das Vulkanisationsverfahren bestimmen das Vernetzungsmittel und den Beschleuniger. Am Häufigsten wird Kautschuk mit einem Schwefel-Beschleuniger-System vernetzt. Hierbei verwendet man elementaren Schwefel in Form von S_8 -Ringen, die mit den in der Haupt- oder Seitenkette des Kautschuks vorkommenden Doppelbindungen reagieren. Um die S_8 -Ringe zu öffnen, müssen sogenannte Beschleuniger zugegeben werden. Der Beschleuniger bildet mit einem Aktivator (Zinkoxid und Stearinsäure) einen Übertragungskomplex, der, abhängig vom Schwefel-Beschleuniger-Verhältnis, in unterschiedlichen Formen Schwefelbrücken ausbilden kann. Damit sind die Verarbeitungs- und Produkteigenschaften sehr gut einstellbar (Morrison & Porter, 1984). In Abb. 2.2 sind die verschiedenen Formen der Schwefelbrücken (I – III) sowie die Möglichkeit der Bildung von zyklischen Thioethern (IV – VI) dargestellt.

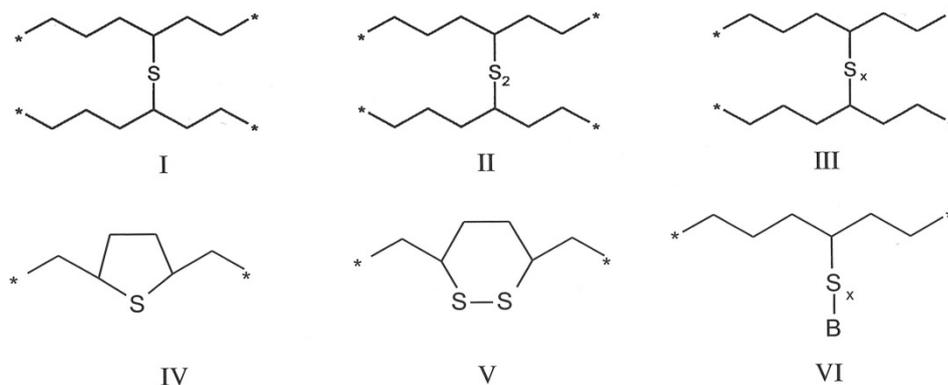


Abb. 2.2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Schwefelbrücken bei der Vernetzung (Röthemeyer & Sommer, 2006).

Neben der Schwefelvernetzung ist die Vernetzung mit Peroxiden die zweithäufigste Methode zu Herstellung von Elastomeren. Bei dieser Methode wird energiereiche Strahlung als Beschleuniger eingesetzt. Auch eine Reaktion von bifunktionellen Gruppen mit reaktiven Gruppen oder Dien-Kautschuk ist weit verbreitet, wird jedoch hauptsächlich für Spezialkautschuke eingesetzt.

2.4 Dynamische Eigenschaften von Elastomeren

Betrachtet man einen Gummiblock genauer kann gezeigt werden, dass sich dieser unter Belastung weder wie ein Festkörper noch wie eine Flüssigkeit verhält. Er weist sogenanntes viskoelastisches Verhalten auf. Dieses viskoelastische Verhalten ist

ausschlaggebend für die zeit-, belastungsgeschwindigkeits- und temperaturabhängigen Eigenschaften von Gummi. Ausgehend von diesem Verhalten kann sehr gut auf die dynamischen Eigenschaften von Elastomeren eingegangen werden.

2.4.1 Allgemeines

Wie bereits erwähnt sind die Eigenschaften von Elastomeren sehr stark durch das viskoelastische Verhalten bestimmt. Dieses Verhalten ist, wie der Name erahnen lässt, eine Kombination aus elastischem und viskosem Verhalten von Körpern. Während Festkörper unter Belastung rein elastisches Verhalten aufweisen und die eingebrachte Verformung vollständig reversibel ist, zeigen Flüssigkeiten rein viskoses Verhalten und die eingebrachte Energie wird zur Gänze in der Flüssigkeit dissipiert. Der Anteil, den das jeweilige Verhalten zum Gesamtsystem beiträgt ist sehr stark von Prüfmethode, Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur abhängig. (Röthemeyer & Sommer, 2006)

Bei der dynamischen Charakterisierung des Verformungsverhaltens von Elastomeren werden die Prüfkörper mit periodischen Kräften beaufschlagt. Betrachtet man die meist sinusförmigen Signale von Kraft und Verformung über die Zeit, so erkennt man eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Signalen (siehe Abb. 2.3), die sich auf das viskoelastische Verhalten der Elastomere zurückführen lässt (Röthemeyer & Sommer, 2006).

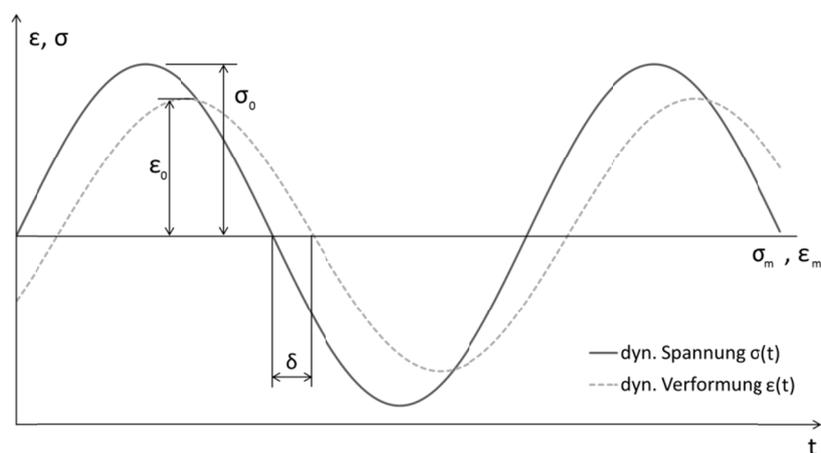


Abb. 2.3: Schematische Darstellung der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung.

Wird bei einem solchen Versuch die periodische Dehnung $\epsilon(t)$ konstant gehalten, so kann die periodische Spannung $\sigma(t)$ dargestellt werden. Der daraus resultierende Elastizitätsmodul E^* ist definiert als Quotient aus Spannungs- (σ_0) und Dehnungsamplitude (ϵ_0) und gilt als Maß für die Steifigkeit eines Elastomeren (siehe

Gleichung 2.1). Der Betrag von E^* kann aufgeteilt werden, wobei E' den Festkörper-Anteil, E'' den Anteil der Flüssigkeit am Gesamtsystem beschreibt und ω als Kreisfrequenz definiert ist (Ehrenstein, Riedel, & Trawiel, 2003; Schrittmesser, 2012).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \sqrt{[E'(\omega)]^2 + [E''(\omega)]^2} \quad (2.1)$$

Analog zum Wechselstrom kann dadurch der elastische als gleichphasiger Anteil sowie der viskose als gegenphasiger Anteil in der Gauß'schen Zahlenebene dargestellt werden (siehe Abb. 2.4). Bei elastomeren Körpern spricht man im Fall des gleichphasigen Anteils vom Speichermodul bzw. im Fall des gegenphasigen Anteils von Verlustmodul. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung wird in Form des Verlustfaktors $\tan(\delta)$ als Gradmesser für den Anteil bezeichnet, mit dem sich Gummi wie eine Flüssigkeit verhält. (Ehrenstein, Riedel, & Trawiel, 2003).

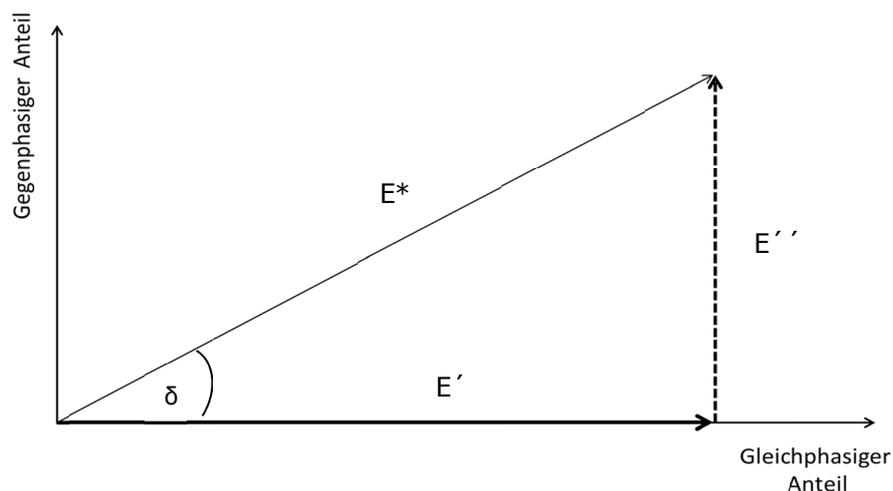


Abb. 2.4: Darstellung des gleich- und gegenphasigen Modul-Anteils in der Gauß'schen Zahlenebene.

2.4.2 Sekantenmodul und Dynamischer Modul

Erstellt man aus den gewonnenen Werten für Kraft und Verformung sogenannte Kraft-Verformungskurven, so erhält man für viskoelastische Werkstoffe eine Hysterese-Schleife in Form einer Ellipse (siehe Abb. 2.5). Die Fläche dieser Hysterese-Schleife gibt Aufschluss darüber, wie viel Energie während eines Zyklus im Werkstoff gespeichert bleibt, wodurch es zu einer Erwärmung des Prüfkörpers kommt. Man bezeichnet diese gespeicherte Energie auch als dissipative Energie. (Röthemeyer & Sommer, 2006).

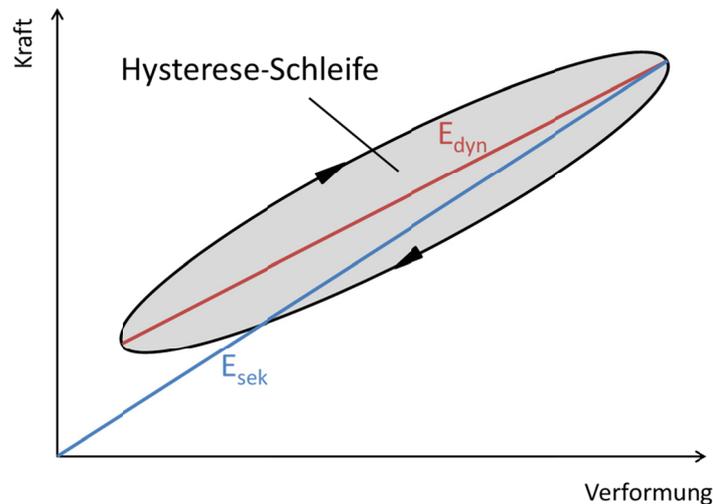


Abb. 2.5: Schematische Darstellung einer Hysterese-Schleife in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm für ungefüllte Elastomere.

Verbindet man die beiden Umkehrpunkte der Hysterese mit einer Geraden so erhält man als Steigung dieser Geraden den sogenannten dynamischen Modul E_{dyn} , der bei Abnahme der Steigung während dynamischer Belastung Aufschluss über die Schädigung des Materials gibt. Ein weiterer Kennwert ist der Sekantenmodul E_{sek} , der als Steigung des Ortsvektors des oberen Umkehrpunktes definiert ist und ebenfalls mit Abnahme der Steigung während dynamischer Belastung Aufschluss über Schädigung und zusätzlich noch über Kriechvorgänge im Material gibt (Vezer, 2011).

2.4.3 Mullins Effekt

Betrachtet man nun gefüllte Elastomere anstelle von ungefüllten, so tritt bei dynamischer Belastung der sogenannte Mullins-Effekt auf. Dieser Effekt ist typisch bei zuvor unbelasteten Proben während der ersten 1-2 Zyklen, in denen es zu einer starken Entfestigung kommt. Einige Arbeiten haben bereits gezeigt, dass diese Entfestigung auf eine Zerstörung von chemischen und physikalischen Bindungen während der Deformation zurückzuführen ist (Büche, 1961; Mullins, 1969; Lion, 2006).

Nach diesen ersten 1-2 Zyklen stellt sich ein annähernd stationärer Zyklus ein, der auch eine gleichbleibende Hysterese liefert. Zu beobachten ist dieser Effekt allerdings nur bei Erhöhung der Amplitude. Bei Verringerung der Amplitude kann man keine Veränderung des stationären Verhaltens beobachten (Besdo & Ihlemann, 1996; Sedlan, 2000). Insgesamt ist der Effekt als die größte Deformation am Bauteil im Laufe seiner Belastung definiert. In Abb. 2.6 ist ein solcher Entfestigungseffekt an gefüllten Elastomeren schematisch dargestellt.

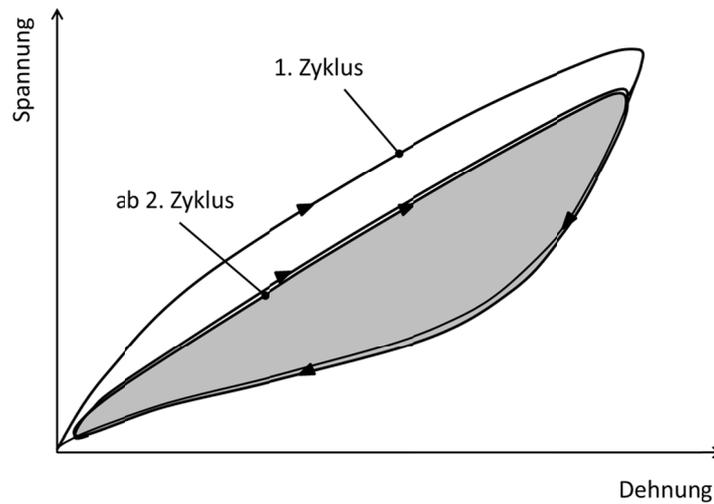


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des Mullins-Effekts.

Im Allgemeinen kommt dem Mullins-Effekt keine besondere Bedeutung zu. Allerdings wurde er in dieser Arbeit erwähnt um die in den Prüfvorschriften geforderten Einschwingvorgänge zu erörtern.

2.4.4 Payne Effekt

Ein weiteres Phänomen bei der dynamischen Belastung von gefüllten Elastomeren ist der sogenannte Payne Effekt (siehe Abb. 2.7). Dieser Effekt wurde vor allem von seinem Namensgeber A. R. Payne in den 1960er Jahren intensiv untersucht und dokumentiert (Payne A. R., 1958; Payne A. R., 1962; Payne & Whittaker, 1971).

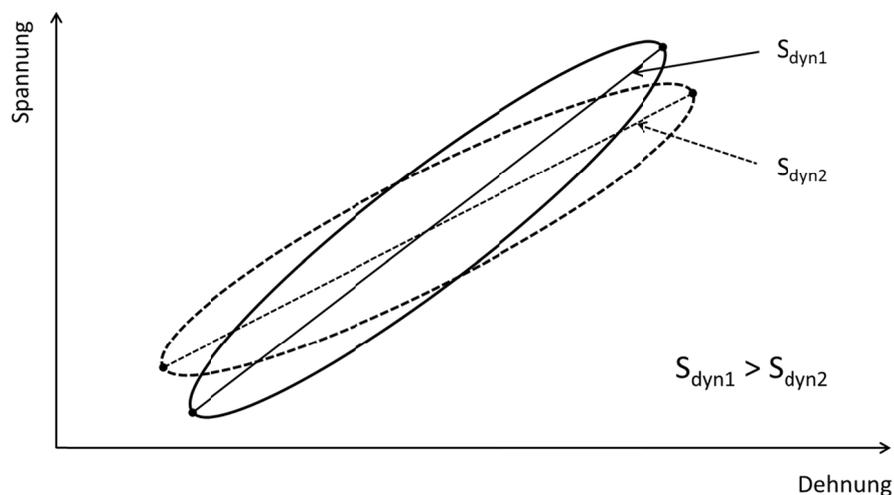


Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Steifigkeitsabnahme bei Erhöhung der Amplitude (Payne Effekt).

Die Steigung einer Geraden zwischen den beiden Umkehrpunkten der Hysterese in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist – ähnlich dem dynamischen Modul aus den Kraft-Verformungskurven – als dynamische Steifigkeit definiert. Nimmt nun diese Steigung mit zunehmender Amplitude ab, so spricht man von Payne Effekt. Während der Mullins-Effekt, wie bereits beschrieben, auf eine Zerstörung von chemischen und physikalischen Bindungen während der Deformation zurückzuführen ist, tritt der Payne Effekt nur bei gefüllten Elastomeren und geringen Dehnungen auf und ist auf ein Aufbrechen der Füllstoff-Füllstoff-Wechselwirkung zurückzuführen.

In Abb. 2.8 ist diese Abhängigkeit der dynamischen Steifigkeit S_{dyn} von der Amplitude schematisch dargestellt. Für sehr große Amplituden stellt sich $S_{\text{dyn},\infty}$ ein, die durch die hydrodynamische Verstärkung sowie die Kopplung zwischen Polymer und Füllstoff definiert ist (Payne A. R., 1962; Gowdner, 1996; Heinrich, 1997).

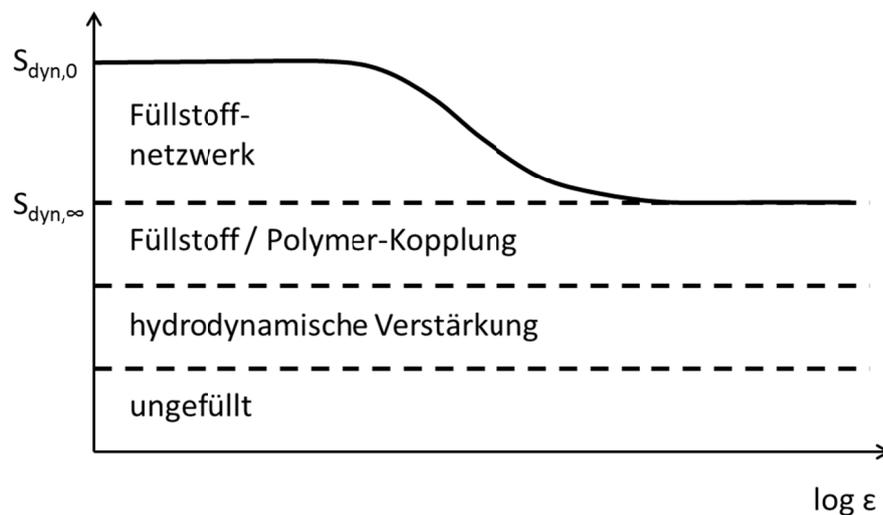


Abb. 2.8: Modell für die amplitudenabhängige dynamische Steifigkeit in Anlehnung an Payne (Grambow, 2003).

2.5 Elastomere im Eisenbahnoberbau

Bereits Anfang des 19. Jahrhunderts wurde die erste Eisenbahnlinie zwischen Stockton und Darlington im Nordosten Englands in Betrieb genommen. Im Laufe der Zeit wurden die Züge immer schneller, die Lokomotiven stärker und das Reisen mit der Bahn umweltfreundlicher. Mit der Erfindung des Gummis und der Weiterentwicklung der technischen Einsetzbarkeit von Elastomeren hielten diese auch im Eisenbahnoberbau Einzug und sind aus heutiger Sicht nicht mehr wegzudenken.

2.5.1 Geschichtliche Entwicklung

„Wenn ich höre, wie die Hügel vom Donnerschrauben des Dampfrosses widerhallen, wie es mit seinen Füßen die Erde erschüttert und Feuer und Rauch aus seinen Nüstern atmet, dann erscheint es, als hätte die Erde nun ein Volk, das würdig ist, sie zu besiedeln.“ Diese Worte des amerikanischen Schriftstellers und Philosophen Henry David Thoreau beschreiben Anmut und Stärke einer Lokomotive, die Mitte des 19. Jahrhunderts entlang der neueröffneten Eisenbahnstrecke zwischen Boston und Worcester in Massachusetts, Vereinigte Staaten, dahinschnaubte. Sie lassen aber auch erahnen wie viel Kraft und Energie notwendig war um einen solchen Stahlkoloss zu bewegen und welche Belastungen für die Umwelt in Form von Rauch und Erschütterungen damit einhergingen.

Seit dieser Zeit hat sich die Eisenbahn stark verändert. Zwar wurde die Entwicklung der Diesellokomotive und später des elektrischen Antriebes hauptsächlich aus dem Wunsch heraus getrieben, den Eisenbahnverkehr schneller zu machen (Deischl, Fenner, Grabe, & Günzel, 1995), jedoch gelang es auch mit diesen Entwicklungen die Eisenbahn als Ganzes zu einem der umweltfreundlichsten Verkehrsmittel unserer Zeit zu machen.

Einerseits durch den Ausbau der Bahnstrecken, andererseits durch das Wachstum der Städte und des Güterverkehrs entstanden aber bald neue Probleme. Auf Grund der zunehmenden Geschwindigkeiten und der höheren Fahrfrequenzen haben sowohl die Lärmbelästigung durch den Abrieb von Rad und Schiene als auch die Erschütterung im Boden stark zugenommen. Ein Meilenstein in der Reduktion dieser Vibrationen war die Einführung des vollständig geschweißten Schienenstrangs. Damit konnte neben einer Erhöhung des Fahrkomforts für Passagiere der Verschleiß am Oberbau wie auch an den sich bewegenden Komponenten deutlich verringert werden. Dies führte jedoch auch dazu, dass der Schienenstrang mit elastischen, aber spannungshaltenden Schienenbefestigungen versehen werden musste um bei Änderung der Umgebungsbedingungen – insbesondere der Temperatur – eine Gleisverwerfung bzw. den Bruch der Schiene unterbinden zu können (Deischl, Fenner, Grabe, & Günzel, 1995).

2.5.2 Unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten

Bevor auf die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten von Elastomeren im Eisenbahnbau eingegangen werden kann, muss eine grundlegende Unterscheidung der Wirkorte von Schwingungen getroffen werden. Die unterschiedlichen Wirkorte sind in

Abb. 2.9 dargestellt. Folgende Unterscheidung für Maßnahmen an den Wirkorten kann getroffen werden (Engst, 1992):

a) aktive Maßnahmen an der Quelle (Fahrweg)

Der Bereich der möglichen aktiven Maßnahmen am Fahrweg ist sehr groß. Hier kommen zum Beispiel Spezialräder an der Lokomotive bzw. den Waggons, unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten oder aber spezielle Oberbausysteme zum Einsatz.

b) passive Maßnahmen am Übertragungsweg (Baugrund)

Diese Maßnahmen können einerseits Änderung der Tunnelwandstärke andererseits offene oder gefüllte vertikale Schlitze im Boden sein (Studer & Ziegler, 1986).

c) passive Maßnahmen am Immissionsort (Bauwerk)

Die passive Schwingungsdämpfung am Immissionsort kann entweder durch Schwingungsisolierung des gesamten Bauwerkes oder durch Anbringen von unterschiedlichen Dämpferelementen unterhalb des Bauwerkes erreicht werden (Engst, 1992).

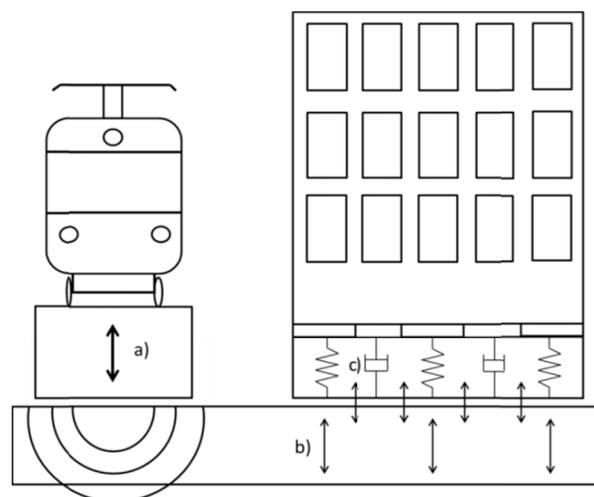


Abb. 2.9: Wirkorte von Schwingungsmechanismen sowie deren Wechselwirkungen
 a) aktive Maßnahmen an der Quelle, b) passive Maßnahmen am Übertragungsweg, c) passive Maßnahmen am Immissionsort (nach Engst, 1992).

Ausgehend von diesen unterschiedlichen Wirkorten wurden in den letzten 40 Jahren zahlreiche Anwendungsformen zur Schwingungsdämpfung entwickelt. Eine Gemeinsamkeit ist jedoch sehr auffällig, denn alle Anwendungsformen machen sich die

schwingungsmindernden Eigenschaften von Elastomeren und elastomerähnlichen Werkstoffen zu Nutze.

Betrachtet man nun die aktiven Maßnahmen am Fahrweg etwas genauer, so wird hier schnell klar, dass unterschiedliche Varianten zum Einsatz kommen. Diese 5 Konzepte werden im Folgenden näher beschrieben (Jaquet, Krüger, & Repczuk, 2006):

1. Schienendämpfung

Bei dieser Variante werden entweder Gummi-Metall-Verbunde mit der Schiene beklebt oder es kommt zum Einsatz eines schienenfuß- und schienenstegumfassenden Profils (siehe Abb. 2.10) (Jaquet, Krüger, & Repczuk, 2006). Der Einsatz dieser Systeme ist derzeit hauptsächlich auf U-Bahnen gerichtet, wobei hier aber schon gezeigt werden konnte, dass eine sehr starke Minderung der Quietschgeräusche erzielt wurde (Herbst & Waßmann, 1983; Krüger & Kasten, 1994).

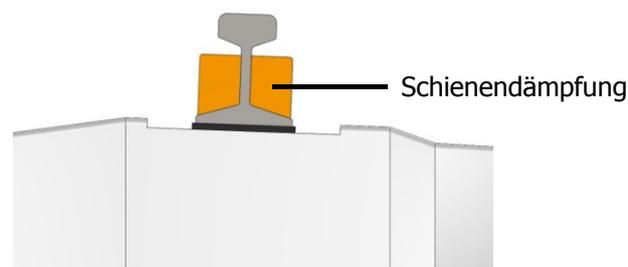


Abb. 2.10: Schematische Darstellung von Schienenendämpfungen.

2. Masse-Feder-System

Die beste Variante zur Dämmung von Körperschall ist das Masse-Feder-System, da hier die größte Erschütterungsisolierung erzielt werden kann. In Abb. 2.11 ist ein solches Masse-Feder-System schematisch dargestellt.

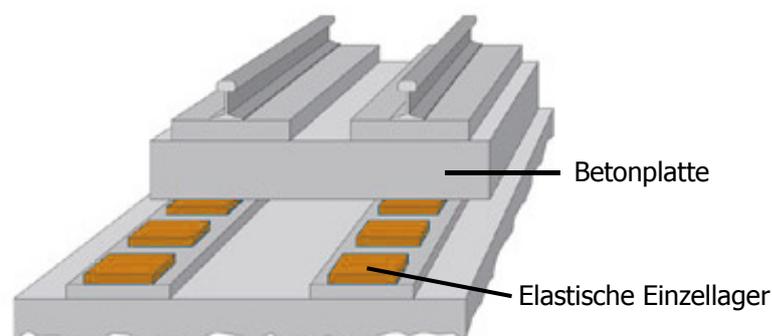


Abb. 2.11: Schematische Darstellung eines Masse-Feder-Systems auf Einzellagern (ÖBB-Infrastruktur AG, 2013).

Beim Masse-Feder-System werden die Gleise auf Betonplatten oder Betontrögen gelagert. Diese sind mit Schotter gefüllt und werden weiters mit einzelnen Elastomerstützlagern oder auf Elastomerstreifenlagern abgefedert (Engst, 1992).

3. Schotteroberbau

Hier hat sich der Einsatz von sogenannten Unterschottermatten bewährt. Dabei werden unter dem Schotterbett vollflächige oder profilierte Elastormatten verlegt (siehe Abb. 2.12), die eine zusätzliche elastische Bettung des Oberbaus gewährleisten. Die Dämmwirkung dieser Unterschottermatten reicht nahe an Masse-Feder-Systeme heran und ist somit eine äußerst wirksame Methode zu Dämmung des Körperschalls. Um das Oberflächenwasser abzuleiten werden in die Unterschottermatten sogenannte Drainagebohrungen eingebracht.

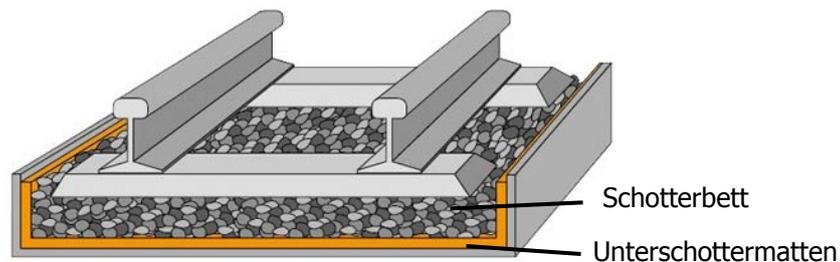


Abb. 2.12: Beispielhafte Anordnung von Unterschottermatten (Getzner Werkstoffe GmbH, 2013).

4. Schwellenlagerung

Eine weitere Möglichkeit Schwingungen im Gleisoberbau zu dämpfen stellt die elastische Lagerung der Schwelle dar. Bei der Schwellenlagerung unterscheidet man zwischen Schwellenschuh und Schwellenbesohlung, wobei Schwellenschuhe die Schwelle teilweise umschließen während bei der Schwellenbesohlung elastische Matten vorwiegend auf die Schwellenunterseite aufgeklebt werden. Abb. 2.13 zeigt die schematische Darstellung einer solchen Schwellenbesohlung.

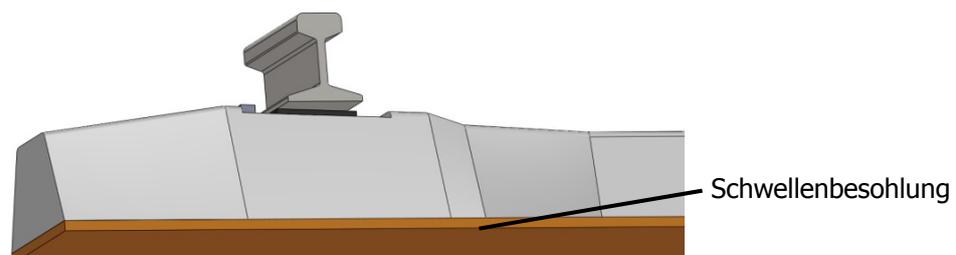


Abb. 2.13: Schematische Darstellung einer Schwellenbesohlung.

5. Schienenlagerung

Bei dieser Variante bedient man sich der erhöhten Einsenkung der Schiene unter Belastung, was hauptsächlich durch weiche Schienenzwischenlagen erreicht wird. Sie werden seit den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts eingesetzt und sind hauptsächlich in Form von nicht-durchgängigen Elastomerlagern (siehe Abb. 2.14) auf dem Markt. Eine weitere Anwendungsform ist die kontinuierliche Schienenlagerung, bei der die gesamte Schiene in Längsrichtung elastische gelagert wird.



Abb. 2.14: Schematische Darstellung einer elastischen Schienenzwischenlage.

Beim Einsatz von elastischen Schienenzwischenlagen gilt es einen guten Kompromiss für die Steifigkeit zu wählen. Einerseits liefert eine höhere Elastizität (niedrigere Steifigkeit) der Zwischenlage eine Verbesserung der Schwingungsdämpfung. Andererseits wird durch diese Verringerung der Steifigkeit die Auslenkung des Schienenkopfes bei Belastung vergrößert, was eine Aufweitung der Fahrspur zur Folge hat. Aus diesem Grund ist die zulässige Einsenkung von Schienenzwischenlagen begrenzt (Engst, 1992).

2.6 Ermittlung der Eigenschaften von Schienenzwischenlagen nach EN 13146

Basierend auf den Informationen der vorigen Kapitel wurde vom österreichischen Normungsinstitut im Jahr 2003 eine europäische Norm (EN) zur Prüfung von Schienenbefestigungssystemen erstellt. Um Mindestanforderungen an die SZL definieren zu können werden hierbei Kurvenfahrten mit unterschiedlichen Kurvenradien und Geschwindigkeiten simuliert. Die EN 13146 regelt alle statischen und dynamischen Prüfverfahren an elastomeren Schienenzwischenlagen (SZL) im unverbauten und verbauten Zustand sowie am gesamten Schienenbefestigungssystem. Im Jahr 2006 wurde die Norm überarbeitet und 2007 um einen Punkt zum bislang endgültigen Umfang erweitert.

Die Norm umfasst nun nach einer weiteren Novellierung folgende Teile (EN 13146, 2012):

- Teil 1: Ermittlung des Durchschubwiderstandes in Längsrichtung
- Teil 2: Ermittlung des Verdrehwiderstandes
- Teil 3: Bestimmung der Dämpfung von Stoßlasten
- Teil 4: Dauerschwingversuch
- Teil 5: Bestimmung des elektrischen Widerstands
- Teil 6: Auswirkung von Umwelteinflüssen
- Teil 7: Bestimmung der Spannkraft
- Teil 8: Betriebserprobung
- Teil 9: Bestimmung der Steifigkeit

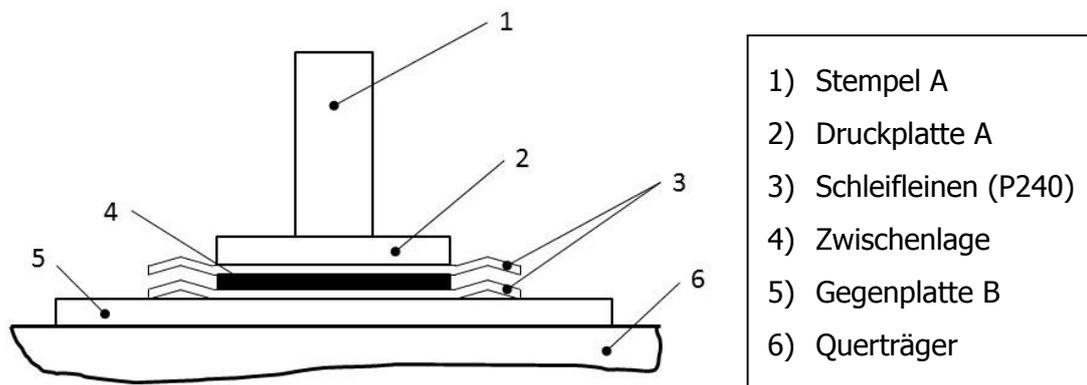
Im Folgenden werden einige Teile genauer beschrieben, wobei für die Auswahl Teil 4 – Dauerschwingversuch ausschlaggebend war. Aus diesem Teil geht hervor, dass sowohl die Ermittlung der Spannkraft als auch die Bestimmung der Steifigkeit und die Ermittlung des Durchschubwiderstandes in Längsrichtung vor und nach dem Dauerschwingversuch durchzuführen ist und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen sind.

2.6.1 Bestimmung der statischen Steifigkeit

Wie bereits in Kapitel 2.5.2 beschrieben, ist ein guter Kompromiss bei der Steifigkeit von Schienenzwischenlagen essenziell. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Grundlagen zur Ermittlung dieser Steifigkeiten zu verstehen.

Die Bestimmung der statischen Steifigkeit von Schienenzwischenlagen nach EN 13146-9 wird im unverbauten Zustand durchgeführt wobei eine Kraft senkrecht auf die SZL aufgebracht und die Einsenkung gemessen wird. Um eine Prüfung unter Normklima zu gewährleisten müssen die zu prüfenden SZL mindestens 16 h vor Beginn der Prüfung bei einer Temperatur von 23 ± 5 °C gelagert werden.

Die Krafteinleitung erfolgt über eine biegesteife Metallplatte, die mindestens so breit wie der Schienenfuß beim Dauerschwingversuch und mindestens 210 mm lang ist. Zwischen Krafteinleitungsplatte und SZL sind Schleifleinen mit einer Körnung zwischen P180 und P240 zu verwenden. Der Aufbau zur Bestimmung der statischen Steifigkeit ist in Abb. 2.15 schematisch dargestellt (EN 13146, 2012).



- 1) Stempel A
- 2) Druckplatte A
- 3) Schleifleinen (P240)
- 4) Zwischenlage
- 5) Gegenplatte B
- 6) Querträger

Abb. 2.15: Prüfaufbau zur Bestimmung von statischen und dynamischen Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen (nach EN 13146, 2012).

Weiters sollen 3 Wegaufnehmer – Linear Variable Differential Transformer (LVDT) – jeweils um 120° versetzt über den Umfang des Druckstempels montiert werden. Nach Einrichtung der LVDT's wird eine Kraft senkrecht auf die Zwischenlage aufgebracht und die Einsenkung an allen drei LVDT's gemessen. Die Gleichmäßigkeit der Einsenkung ist zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren, da die Einleitung der Kraft vom Druckstempel auf die Druckplatte durch eine kugelförmige Auflagefläche zu erfolgen hat.

Je nach Belastungskategorie wird durch den Druckstempel A eine Kraft F_{SPmax} gemäß Tabelle 2.1 mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 120 kN/min auf die SZL aufgebracht. Die dieser Tabelle zu Grunde liegenden Werte wurden aus der EN 13481-2 ermittelt, wobei die Kategorien unterschiedlichen Kurvenradien zugeordnet sind. Die unterschiedlichen Kurvenradien erlauben verschiedene Fahrgeschwindigkeiten im Betrieb und haben somit auch verschiedene Lasten auf das Schienenbefestigungssystem zur Folge (EN 13481-2, 2012).

Anschließend wird die Kraft auf die theoretische Kraft des Spannelements (F_{SP1}) mit derselben Belastungsgeschwindigkeit reduziert und dieser Zyklus aus Be- und Entlastung 3mal wiederholt (EN 13146, 2012). Diese Vorbelastungen sollen dem in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Mullins Effekt vorbeugen.

Ausgehend von der Norm soll beim 3. Zyklus die Einsenkung während der Erhöhung der Kraft F_{SP2} , was 80 % der Maximalkraft F_{SPmax} entspricht, aufgezeichnet werden, um eine Darstellung der Messwerte in Form von Kraft-Verformungskurven zu ermöglichen (siehe Abb. 2.16).

Tabelle 2.1: Lasten zur Messung der Steifigkeiten von Schienenzwischenlagen (gemäß EN 13481-2).

Kategorie	F_{SP1}, F_{LFP1} [kN]	F_{SPmax}, F_{LFPmax} [kN]
A	16	51
B	18	64
C	18	85
D	18	85
E	20	119

Diese Kraft-Verformungskurven geben Aufschluss über die statische Steifigkeit k_{SP} der SZL, die als Steigung der Geraden zwischen F_{SP1} und F_{SP2} definiert ist.

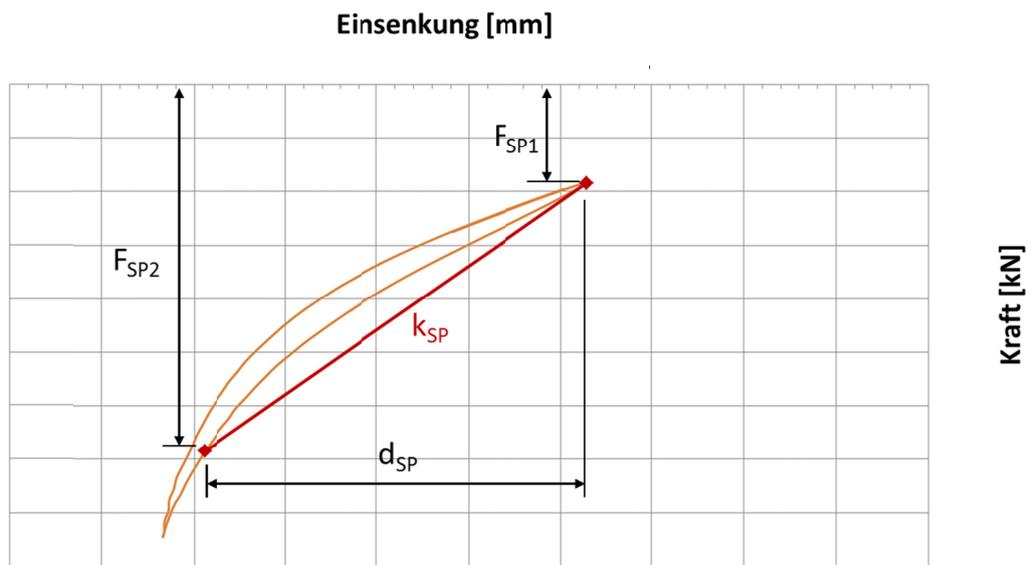


Abb. 2.16: Darstellung einer Kraft-Verformungskurve zur Auswertung der statischen Steifigkeit k_{SP} .

Anschließend wird die statische Steifigkeit nach Gleichung 2.2 ermittelt. Hierbei ist d_{SP} der arithmetische Mittelwert der Einsenkungen an der Schienenzwischenlage.

$$k_{SP} = \frac{F_{SP2} - F_{SP1}}{d_{SP}} \tag{2.2}$$

2.6.2 Bestimmung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit

Aufgrund der Veränderung der Steifigkeit von Elastomeren unter dynamischer Belastung, sind auch diese Prüfungen zur Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit von SZL durchzuführen. Im Allgemeinen tritt bei dynamischer Belastung eine frequenz- und amplitudenabhängige Steifigkeitsänderung auf, die auch als „dynamische Verhärtung“ bezeichnet wird (Müller-Boruttau & Breitsamter, 2003).

Wie die Bestimmung der statischen Steifigkeit wird auch die Bestimmung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit an einer Schienenzwischenlage im unverbauten Zustand durchgeführt. Die vorbereitenden Maßnahmen sowie Prüftemperatur und Aufbau für diese Prüfung sind genau wie bei der Bestimmung der statischen Steifigkeiten. Auch hier werden 3 LVDT´s montiert, um die Gleichmäßigkeit der Einsenkung der Druckplatte sicherzustellen.

Je nach Belastungskategorie wird nun eine sinusförmige, zyklische Kraft zwischen der theoretischen Kraft des Spannelements F_{LFP1} und F_{LFP2} , was 80 % der Maximalkraft F_{LFPmax} entspricht, bei drei verschiedenen Prüffrequenzen aufgebracht (siehe Tabelle 2.1). Um den in den Kapiteln 2.4.3 und 2.4.4 beschriebenen Effekten vorzubeugen sind die Prüfkörper für 10 s mit der zu prüfenden Frequenz zu belasten. Die dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten k_{LFP} sind bei folgenden Prüffrequenzen durchzuführen:

- a) 5 ± 1 Hz,
- b) 10 ± 1 Hz,
- c) 20 ± 1 Hz.

Nach den oben erwähnten 10 s sind bei jeder der 3 Frequenzen für weitere 10 Zyklen die Signale für Kraft und Verformung mit mindestens 20 Messwerten pro Zyklus aufzuzeichnen. Aus den aufgezeichneten Werten werden Kraft-Verformungskurven erstellt und die dynamische, niederfrequente Steifigkeit als Steigung der Geraden zwischen den beiden Wendepunkten der über die 10 Zyklen gemittelten Kurve ermittelt (siehe Abb. 2.17).

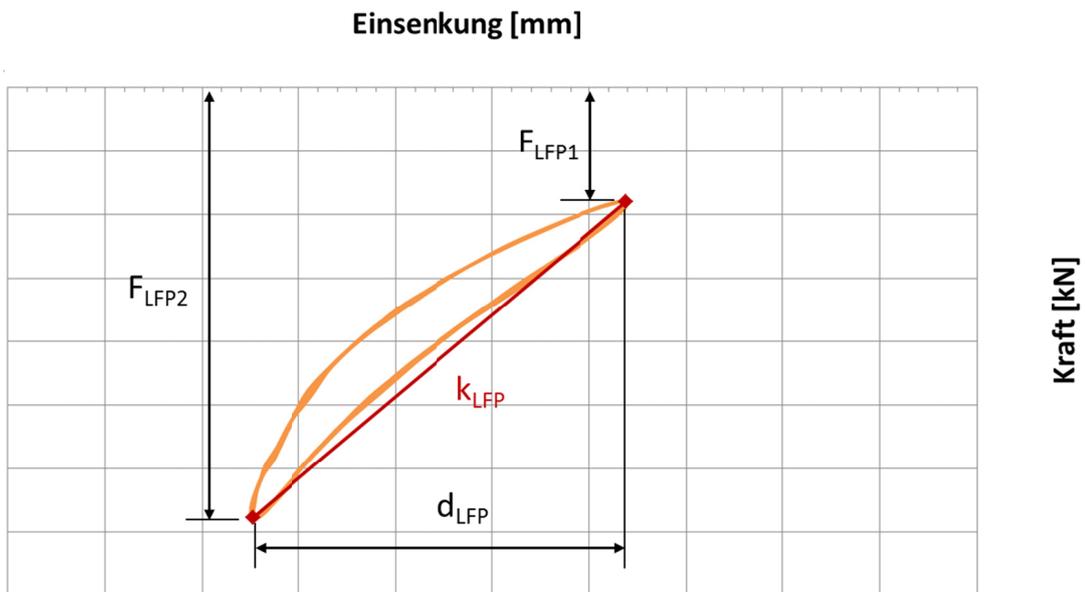


Abb. 2.17: Darstellung einer Kraft-Verformungskurve zur Auswertung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit k_{LFP} .

Anschließend wird die dynamische, niederfrequente Steifigkeit nach Gleichung 2.3 ermittelt. Hierbei ist d_{LFP} der arithmetische Mittelwert der Einsenkungen an der Schienenzwischenlage.

$$k_{LFP} = \frac{F_{LFP2} - F_{LFP1}}{d_{LFP}} \quad (2.3)$$

2.6.3 Bestimmung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems

Für die Bestimmung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems wird die Schienenzwischenlage im verbauten Zustand geprüft. Dafür ist die Verwendung eines Betonblocks bzw. einer halben oder ganzen Gleisschwelle erforderlich, in der die für die Befestigung notwendigen Komponenten eingelassen sind. Weiters sind alle Komponenten zu verwenden, die für die Befestigung einer Schiene im Gleisbau benötigt werden, inklusive einer kurzen Schiene. Auch hier müssen alle benötigten Materialien und Prüfkörper mindestens 16 h vor Beginn der Prüfung bei einer Temperatur von $23 \pm 5 \text{ °C}$ gelagert werden. Der Aufbau der Prüfanordnung ist in Abb. 2.18 dargestellt.

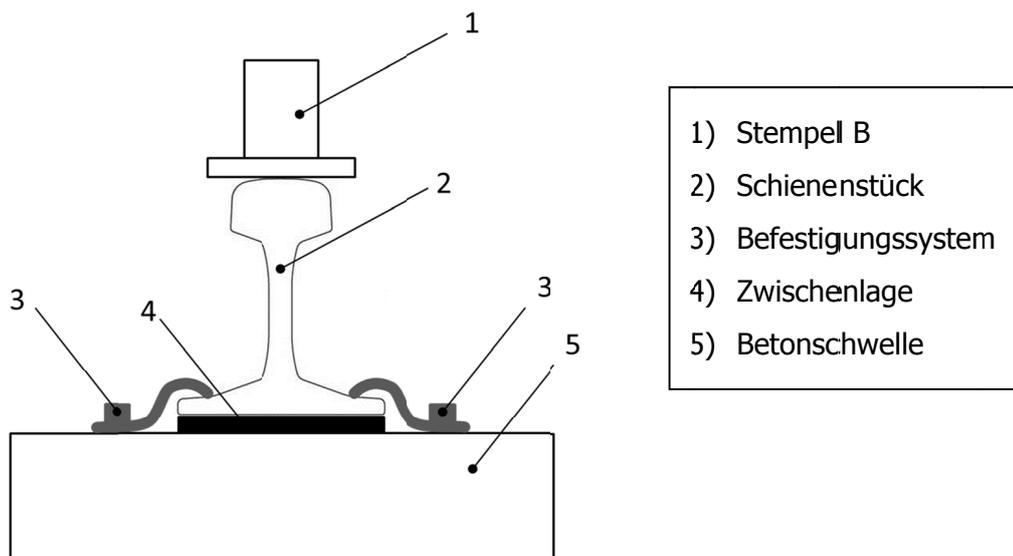


Abb. 2.18: Prüfaufbau zur Bestimmung der statischen Steifigkeit am gesamten Schienenbefestigungssystem (nach EN 13146, 2012).

Nach erfolgtem Zusammenbau der Komponenten sind 4 LVDT's zu Messung der Einsenkungen an den Ecken des Schienenfußes anzubringen, wobei der Abstand zur Schienenfußkante 10 mm betragen soll (siehe Abb. 2.19). Die Einleitung der Kraft erfolgt senkrecht zur Schienenunterseite wobei die Gleichmäßigkeit der Einsenkungen wieder zu überprüfen ist.

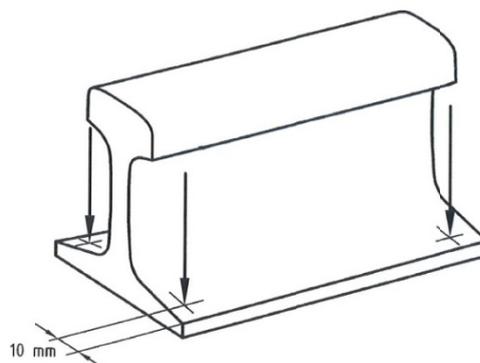


Abb. 2.19: Darstellung der Anbringung von 4 Wegaufnehmern zur Messung der Einsenkungen (EN 13146, 2012).

Je nach Belastungskategorie wird wieder eine Kraft F_{SAmax} gemäß Tabelle 2.2 mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 120 kN/min auf die SZL aufgebracht (EN 13481-2, 2012). Danach wird die Kraft auf $F_{SA1} = 1$ kN mit einer Geschwindigkeit von 120 kN/mm entlastet und dieser Zyklus aus Be- und Entlastung 3mal wiederholt (EN 13146, 2012).

Tabelle 2.2: Aufzubringende Lasten zur Messung der Steifigkeiten des gesamten Schienenbefestigungssystems (gemäß EN 13481-2).

Kategorie	F_{SA1}, F_{LFA1} [kN]	F_{SAmax}, F_{LFAmax} [kN]
A	1	32
B	1	43
C	1	64
D	1	64
E	1	95

Beim 3. Zyklus wird die Einsenkung während der Erhöhung der Kraft auf F_{SA2} , was 80 % der Maximalkraft F_{SAmax} entspricht, aufgezeichnet. Die Signale für Kraft und Verformung werden gemäß EN 13146 zur Generierung von Kraft-Verformungskurven aufgezeichnet. Diese Kurven geben Aufschluss über die statische Steifigkeit der SZL am Befestigungssystem k_{SA} , die als Steigung der Geraden zwischen F_{SA1} und F_{SA2} definiert ist. In Abb. 2.20 ist eine solche Kraft-Verformungskurve sowie die daraus zu ermittelnde statische Steifigkeit dargestellt.

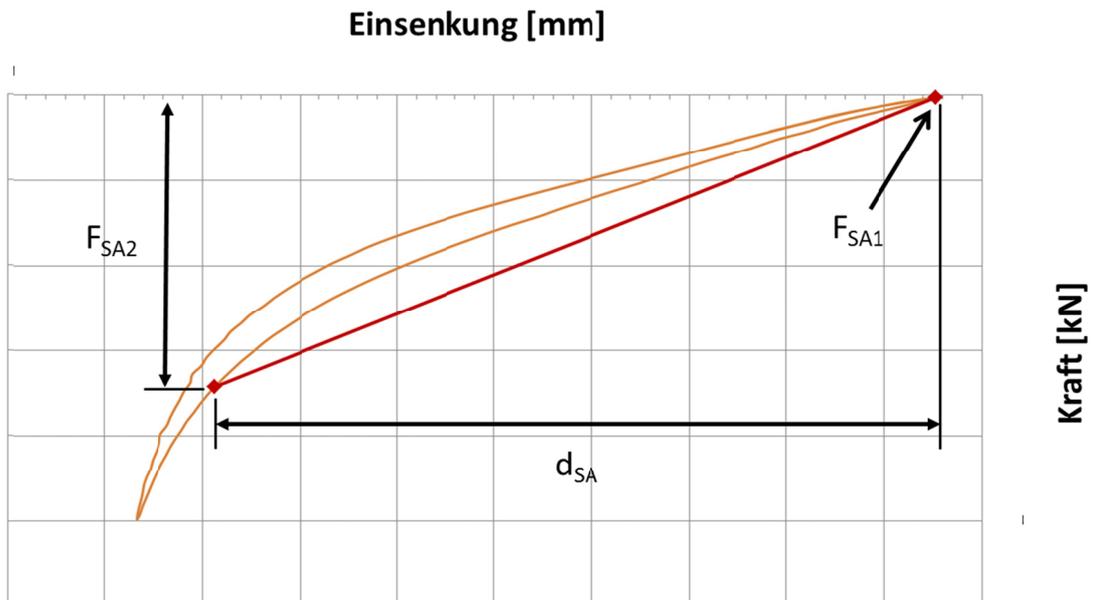


Abb. 2.20: Darstellung einer Kraft-Verformungskurve zur Ermittlung der statischen Steifigkeit des gesamten Schienenbefestigungssystems k_{SA} .

Nach der Messung wird die statische Steifigkeit des Schienenbefestigungssystems nach Gleichung 2.4 ermittelt. Hier ist d_{SA} der arithmetische Mittelwert aller 4 Einsenkungen an der Schienenzwischenlage.

$$k_{SA} = \frac{F_{SA2} - F_{SA1}}{d_{SA}} \quad (2.4)$$

2.6.4 Bestimmung des Durchschubwiderstandes

Um im Falle eines Gleisbruchs das Durchrutschen der Schienen durch das Befestigungssystem zu verhindern, müssen Schienenzwischenlagen eine gewisse Oberflächenreibung zur Schienenunterseite hin aufweisen. Eine Überprüfung dieser Oberflächenhaftung erfolgt mit der Bestimmung des Durchschubwiderstandes, wobei die hierbei ermittelte Kraft Aufschluss darüber gibt, welche maximale Längskraft auf die Schiene aufgebracht werden kann, ohne eine bleibende Verschiebung der Schiene hervorzurufen.

Wie auch die Bestimmung der Steifigkeit des Befestigungssystems erfolgt die Bestimmung des Durchschubwiderstandes an SZL im verbauten Zustand. Um eine gleichmäßige Prüftemperatur bei allen Komponenten zu gewährleisten müssen diese 4 h vor der Prüfung bei $23 \pm 5 \text{ °C}$ gelagert werden. Der Aufbau laut EN 13146-1 ist ähnlich dem unter Kapitel 2.6.3 beschriebenen Aufbau. Allerdings ist die Einleitung der Kraft in Längsrichtung der Schiene. Hierfür wird eine Zugkraft an einer Stirnseite der Schiene aufgebracht und bis zu einem Maximalwert – abhängig von der Belastungskategorie – gesteigert. Die Messung der Verschiebung der Schiene sollte an der gegenüberliegenden Stirnseite der Schiene erfolgen (siehe Abb. 2.21).

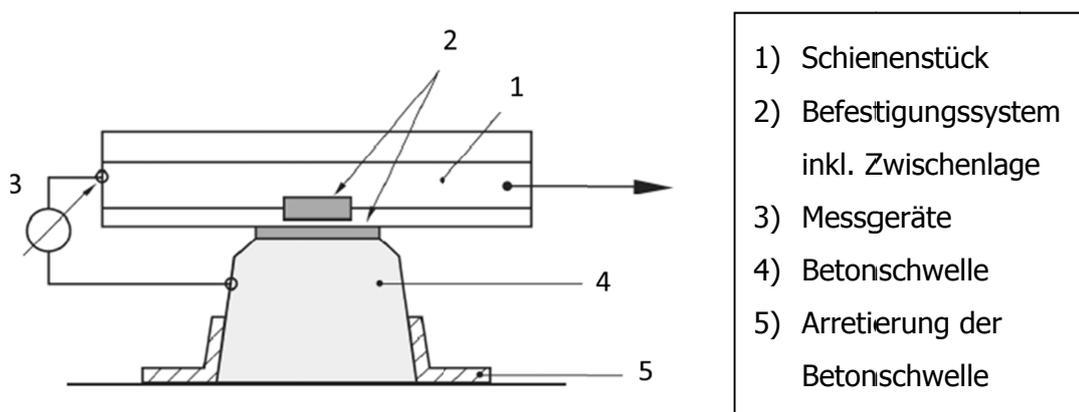


Abb. 2.21: Schematische Prüfanordnung zur Ermittlung des Durchschubwiderstandes (EN 13146, 2012).

Sobald nun die Schiene in Längsrichtung belastet wird, startet die Aufzeichnung der Längsverschiebung der Schiene relativ zur Betonschwelle. Die Last wird so lange aufgebracht, bis die Schiene durch das Befestigungssystem gleitet oder bis die Kraft das 4-fache der geforderten Belastungsanforderung erreicht. In beiden Fällen ist die Belastung abrupt abbrechen und die Aufzeichnung der Längsverschiebung noch weitere 2 min aufrechtzuerhalten. Dieser Ablauf wird ohne Demontage des Systems weitere 3mal wiederholt. Die Messwerte aus dem ersten Zyklus werden verworfen, da dieser lediglich eine Voreichung darstellen soll. Die Messwerte der 3 anderen Zyklen werden wie in Abb. 2.22 dargestellt als Kraft-Verformungskurven aufgetragen.

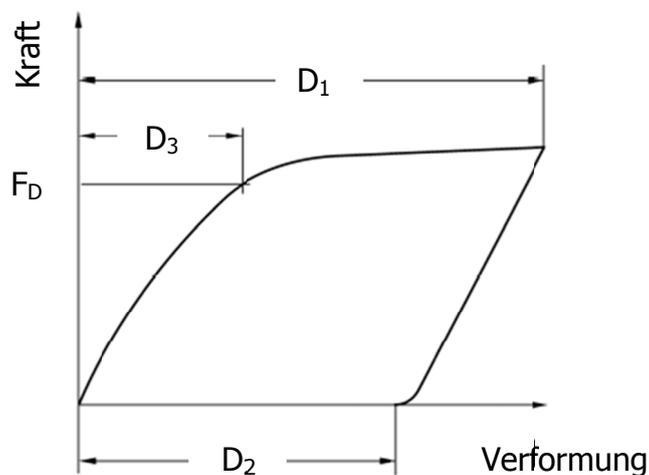


Abb. 2.22: Kraft-Verformungskurve zur Auswertung des Durchschubwiderstandes (EN 13146, 2012).

Anschließend werden die Verschiebungen D_1 und D_2 bestimmt und D_3 mit Gleichung 2.5 bestimmt. Der Durchschubwiderstand F_D ist jener Kraftwert, der bei D_3 abgelesen werden kann. Sollte der ermittelte Wert für $D_3 \leq 0,5$ mm sein, so ist eine Verschiebung von 0,5 mm für die Auswertung heranzuziehen. Im Falle, dass die aufgebrachte Kraft größer oder gleich dem 4-fachen der geforderten Belastungsanforderung ist, so ist F der geprüfte maximale Wert.

$$D_3 = D_1 - D_2 \quad (2.5)$$

2.6.5 Bestimmung der Spannkraft

Bei diesem Versuch wird jene Kraft ermittelt, die vom Befestigungssystem auf den Schienenfuß ausgeübt wird. Durchgeführt wird die Ermittlung der Spannkraft am

gesamten Befestigungssystem durch Messung der erforderlichen Kraft zur Trennung der Schiene von der SZL.

Der in Kapitel 2.6.3 beschriebene Aufbau entspricht genau dem für die Ermittlung der Spannkraft geforderten Aufbau, allerdings mit der Ausnahme, dass die Einleitung der Kraft nicht in Druck- sondern in Zugrichtung auf die Schiene aufgebracht wird. Dies gelingt mit Hilfe eines zusätzlichen Adapters, mit dem die Schiene vertikal nach oben gezogen werden kann (siehe Abb. 2.23).

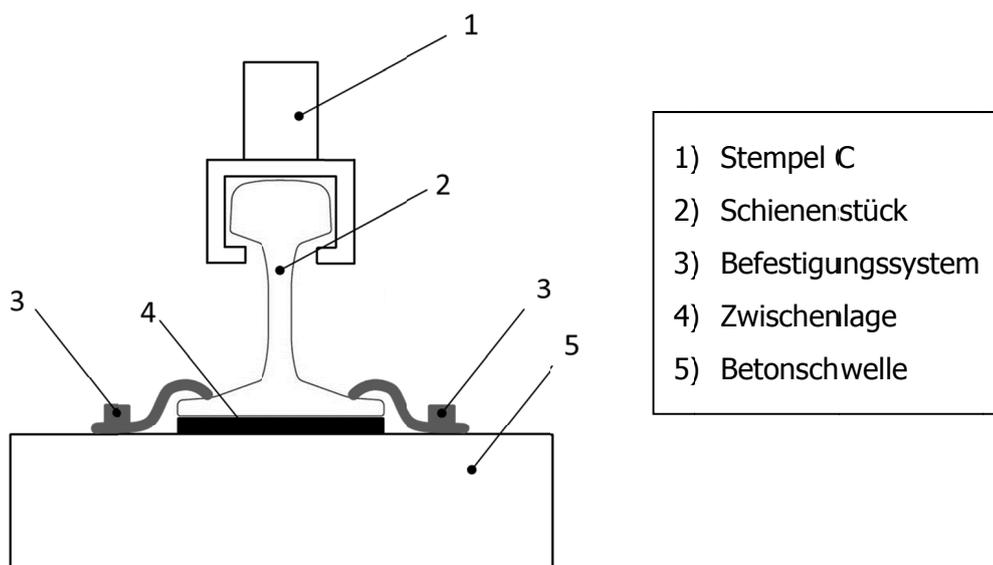


Abb. 2.23: Prüfaufbau zur Bestimmung der Spannkraft (nach EN 13146, 2012).

Nach Herstellen des Aufbaus und Anbringung von 4 LVDT's am Schienenfuß (siehe Abb. 2.19) wird eine Belastung senkrecht zur Schienenunterseite auf Zug aufgebracht. Die Belastung erfolgt solange, bis sich die SZL gerade entfernen lässt. Nach Entfernung der SZL wird die Last soweit reduziert, bis die LVDT's null anzeigen. Die nun angezeigte Last wird als Last P definiert. Anschließend wird die Kraft auf 90 % von P verringert und die Aufzeichnung gestartet. Nun wird die Belastung auf 110 % von P mit einer Geschwindigkeit von 10 kN/min erhöht. Die ermittelten Messwerte werden in einem Kraft-Weg-Diagramm dargestellt und die Kraft P_0 beim über die 4 LVDT's gemittelten Weg $d = 0$ mm abgelesen.

Der gesamte Ablauf wird 2mal wiederholt und die ermittelten Kräfte der 3 Durchgänge gemittelt. Die Spannkraft des Befestigungssystems ist der so errechnete Mittelwert.

2.6.6 Dauerschwingversuch

Der Dauerschwingversuch ist nach EN 13146 keine Prüfmethode im eigentlichen Sinn. Er soll lediglich eine Beanspruchung der Schienenzwischenlage über $3 \cdot 10^6$ Zyklen darstellen und so eine Alterung der SZL simulieren. Das Grundprinzip ist die Aufbringung einer zyklischen Kraft mit konstanter Amplitude. Die Höhe der Kraft sowie die Richtung der Krafteinleitung sind einerseits durch die Belastungskategorie, andererseits durch die statische Steifigkeit der SZL bestimmt.

Grundsätzlich sind laut EN 13146-4 zwei verschiedene Prüfaufbauten möglich. Variante 1 ist der Schrägaufbau, wobei die Schwelle inklusive SZL, Befestigungssystem und Schiene um einen Winkel α geneigt wird. Zusätzlich wird zwischen der stabilen Unterlage eine Holz- bzw. Gipskartonplatte eingelegt, die das Schotterbett simulieren soll. Die Krafteinleitung erfolgt in vertikaler Richtung (siehe Abb. 2.24).

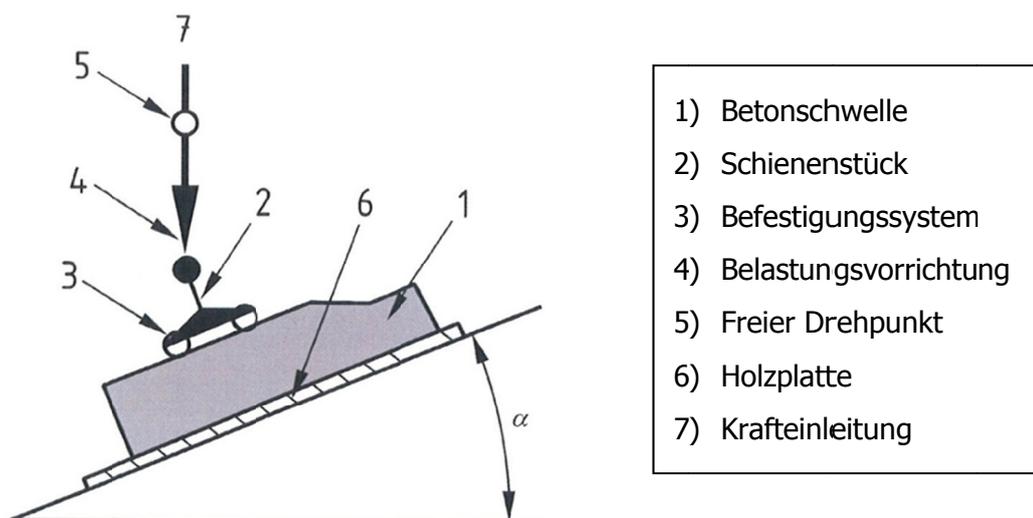


Abb. 2.24: Prüfanordnung für die Verwendung einer Schiene im Schrägaufbau (EN 13146, 2012).

Bei Variante 2 ist die gleichzeitige Prüfung von zwei SZL vorgesehen. Diese Prüfanordnung nimmt jedoch ungleich mehr Platz in Anspruch und auch die erforderlichen Kräfte sind zu verdoppeln. Der Aufbau – wie in Abb. 2.25 dargestellt – ist hierbei ohne Schrägstellung des Gleissystems jedoch mit Schrägstellung der Krafteinleitung auf die Schiene durchzuführen (EN 13146, 2012).

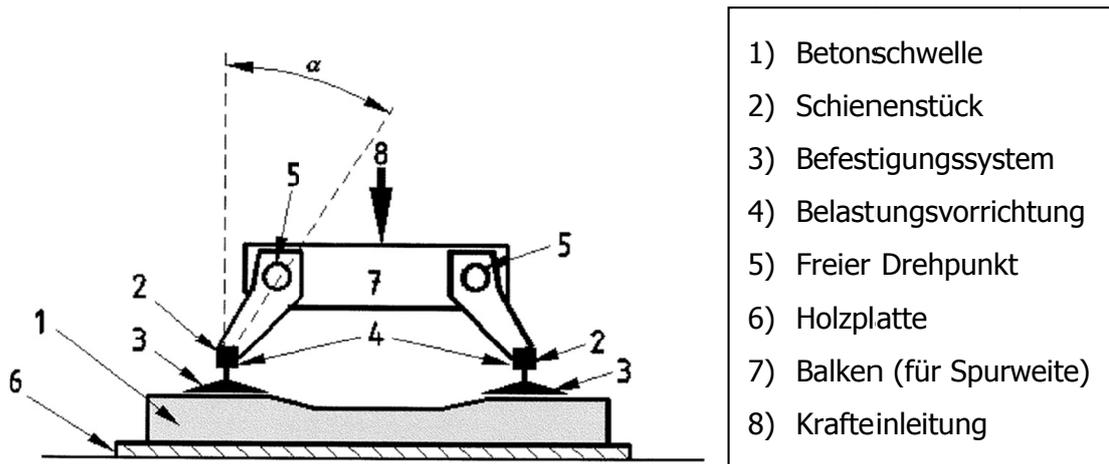


Abb. 2.25: Prüfanordnung für die Verwendung von 2 Schienen in Scherenanordnung (EN 13146, 2012).

Nach EN 13146-4 ist vor bzw. nach dem Dauerversuch die Überprüfung der Spannkraft des Systems, der Durchschubwiderstand und die statische Steifigkeit des Befestigungssystems in folgender Reihenfolge durchzuführen, wobei während des gesamten Ablaufs kein Teil des Befestigungssystems angepasst oder nachgespannt werden darf (EN 13146, 2012):

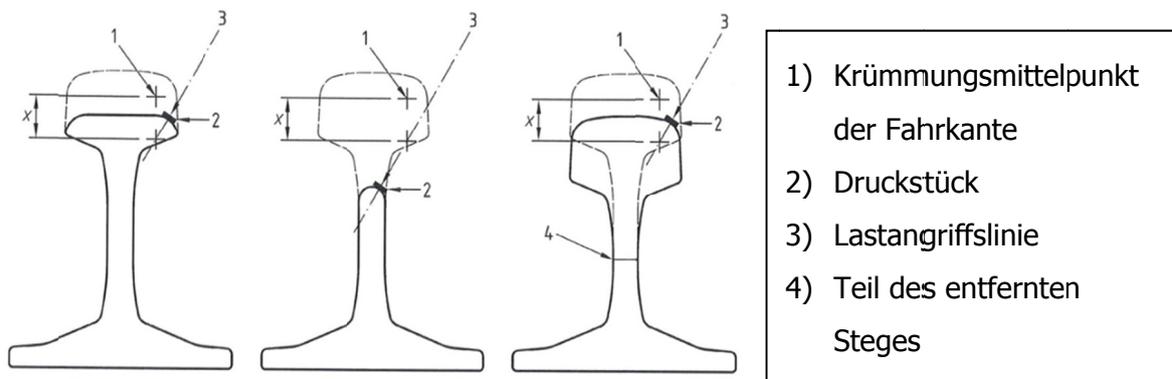
- a) Ermittlung der Spannkraft
- b) Ermittlung des Durchschubwiderstandes
- c) Bestimmung der vertikalen Steifigkeit des Befestigungssystems
- d) Zyklische Belastung
- e) Bestimmung der vertikalen Steifigkeit des Befestigungssystems
- f) Ermittlung des Durchschubwiderstandes
- g) Ermittlung der Spannkraft

Die Belastungsvorrichtung muss eine Breite von 100 ± 10 mm aufweisen und an der Kontaktfläche zur Schiene einen größeren Krümmungsradius als der Schienenkopf aufweisen um stets eine Linienbelastungen zu gewährleisten. Die aufzubringenden Kräfte für die zyklische Belastung sind abhängig von der Belastungskategorie und der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der SZL aus Tabelle 2.3 zu ermitteln. Der Winkel α gibt hier die Schrägstellung des Systems an und X ist der Abstand zwischen dem Krümmungsmittelpunkt der Fahrkante an der Schiene und dem Punkt an dem die Kraft eingeleitet werden muss (siehe Abb. 2.26).

Tabelle 2.3: Prüflasten und -positionen für den Dauerversuch (EN 13481-2, 2012).

Kategorie	Winkel α [°]	Abstand X [mm]	Prüflast F [kN]	
			k_{LFA} < 200 kN/mm	k_{LFA} ≥ 200 kN/mm
A	38,6	25	55	55
B	38,6	25	62	65
C	33	15	75	83
D	26	15	70	76
E	40	75	100	108

Abbildung 2.26 macht zusätzlich deutlich, dass die Schienen für unterschiedliche Belastungskategorien in der Höhe bearbeitet werden müssen, um eine anwendungsnahe Krafteinleitung zu gewährleisten.

**Abb. 2.26:** Anordnung der Krafteinleitung und Darstellung des Abstandes X vom Krümmungsmittelpunkt der Fahrkante (EN 13146, 2012).

Um die Längs- und Querverschiebungen der Schiene zu messen sind insgesamt 6 Wegaufnehmer zu verwenden, die mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm arbeiten. Die Anordnung der LVDT's ist in Abb. 2.27 dargestellt, wobei die beiden LVDT's am Schienenkopf die Neigung und die 4 LVDT's am Schienenfuß die Einsenkung der Schiene aufzeichnen.

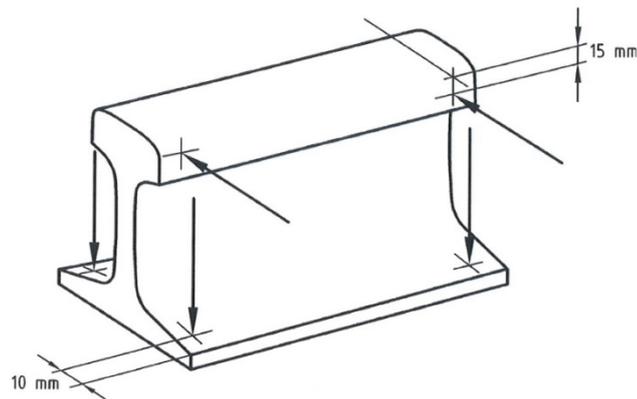


Abb. 2.27: Darstellung der Anbringung von 6 Wegaufnehmern zur Messung der Schienenneigung und der Einsenkungen (EN 13146, 2012).

Nach herstellen der richtigen Prüfanordnung wird die Maximallast $F \pm 1 \text{ kN}$ mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 100 kN/min aufgebracht. Anschließend wird die Belastung auf $5 \pm 1 \text{ kN}$ reduziert und diese Belastungsfolge weitere 10mal mit derselben Lastrate wiederholt. Nun wird der Prüfkörper für $3 \cdot 10^6$ Lastspiele mit einer Prüffrequenz von $4 \pm 1 \text{ Hz}$ belastet. Während der ersten 1000 sowie der letzten 1000 Zyklen sind die Werte für Kraft, Schienenneigung und Einsenkung des Schienenfußes aufzuzeichnen. Dazwischen können diese Werte aus Informationsgründen aufgezeichnet werden.

Wie bereits beschrieben sind im Anschluss an den Dauerversuch sowohl der Durchschubwiderstand als auch die statische Steifigkeit des Systems erneut zu bestimmen. Folgende Abweichungen dürfen hierbei zwischen vor bzw. nach dem Dauerschwingversuch nicht überschritten werden:

- Durchschubwiderstand in Längsrichtung: $\leq 20 \%$
- Vertikale statische Steifigkeit: $\leq 25 \%$

Im Anschluss an die Versuche ist der Prüfkörper optisch zu beurteilen und der Verschleiß zu dokumentieren.

3 EXPERIMENTELLES

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die geprüften Werkstoffe und die verwendeten Prüfkörper geben sowie die verwendeten Geräte und Maschinen beschreiben. Weiters soll die Entwicklung eines Prüfstandes für die unter Kapitel 2.6 beschriebenen Prüfnormen inklusive Berechnung und Konstruktion desselben dargestellt werden.

3.1 Untersucher Werkstoff

Bei dem zu prüfenden Material handelt es sich um ein Elastomer, dessen genaue Details und Zusammensetzung aus Gründen der Geheimhaltung von der Fa. Semperit Technische Produkte GmbH nicht bekanntgegeben wurde.

3.2 Verwendete Prüfkörper

Wie bereits beschrieben, waren die zu prüfenden Elastomerplatten sogenannte Schienenzwischenlagen. Insgesamt wurden fünf verschiedene Prüfkörper verwendet, die sich einerseits in der Zusammensetzung und andererseits in den Abmessungen unterscheiden. Sowohl Zusammensetzung als auch Abmessungen werden durch Normen und Eisenbahnbetreiber vorgegeben und bedingen unterschiedliche Steifigkeiten. Die Herstellung aller Prüflinge erfolgte im Spritzgießverfahren und wurde von Fa. Semperit Technische Produkte GmbH durchgeführt. Folgende Prüfplatten wurden bei der Durchführung der Versuche für diese Masterarbeit verwendet:

a) ZW 700 / ZW 900

Eine der am Häufigsten eingesetzten SZL ist die ZW 700. Sie weist eine rechteckige Grundform auf, die durch zusätzliche Laschen in Breiten- und Dickenrichtung erweitert ist. Diese Laschen wurden vor allem für einen besseren Halt gegen Durchrutschen bzw. gegen den seitlichen Versatz der SZL gegenüber der Betonschwelle entwickelt. Die große Auflagefläche weist auf Grund von Materialreduktion Ausnehmungen auf, wobei die profilierte Fläche beim Einbau der SZL zur Betonschwelle hin zeigt. In Abb. 3.1 ist die ZW 700 mit den grundlegenden Abmessungen dargestellt. Die ZW 900 unterscheidet sich von der ZW 700 nur in der Plattendicke, welche im Vergleich zur ZW 700 9 mm beträgt.

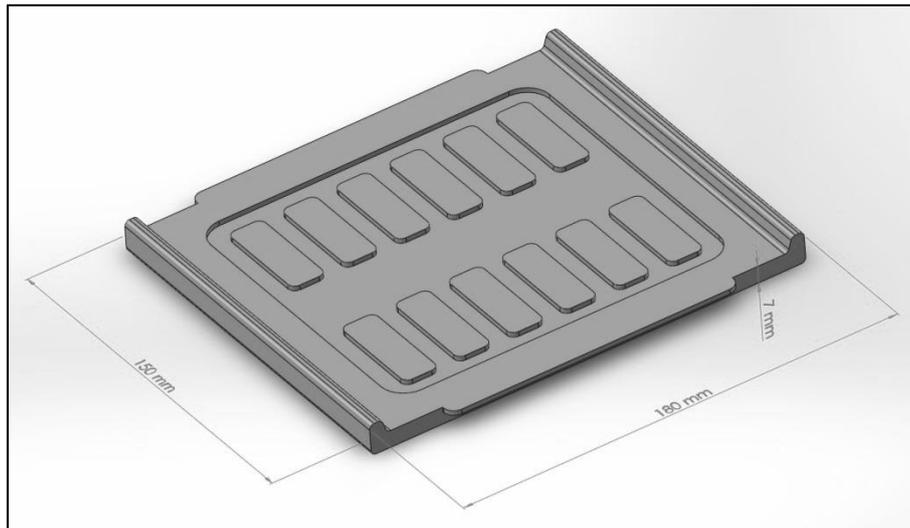


Abb. 3.1: Darstellung der ZW 700 mit den grundlegenden Abmessungen.

b) W 15126 / W 15127

Diese Prüfplatten sind von den vorher genannten Prüfplatten vollkommen verschieden. Sie unterscheiden sich sowohl in der Bauform als auch in der Zusammensetzung. Lediglich die Gesamtabmessungen sind annähernd gleich, wie in Abb. 3.2 zu sehen ist.

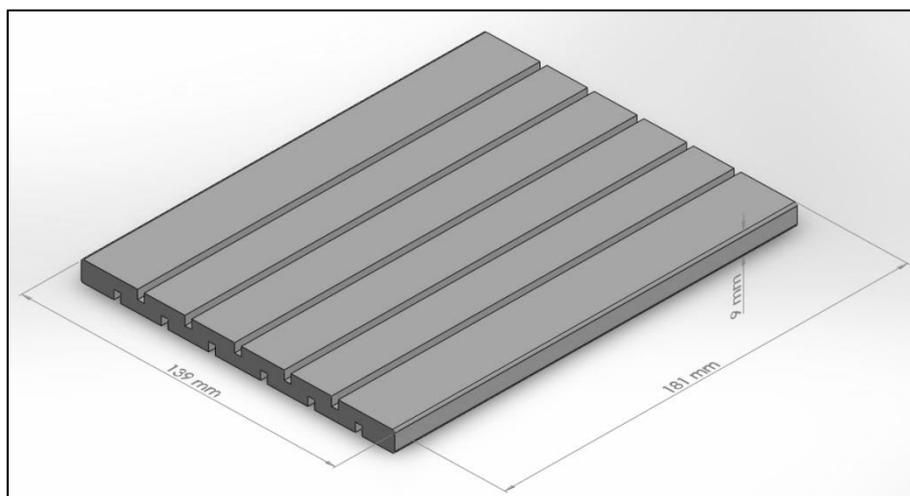


Abb. 3.2: Darstellung der W 15126 mit den grundlegenden Abmessungen.

Der wohl auffälligste Unterschied ist das Fehlen der seitlichen Laschen. Das Durchschieben der Platten wird hier durch eine höhere Steifigkeit und Oberflächenhaftung der SZL verhindert. Anstelle der an der Fläche befindlichen Erhöhungen sind bei diesen Platten gleichmäßige, durchgängige Längsrillen mit 4 mm Tiefe an beiden Seiten eingebracht, die zusätzlich einen höheren Seitenhalt gewährleisten.

Auch hier unterscheiden sich die beiden Platten untereinander nur durch eine leichte Änderung bei den Abmessungen. Für die W 15127 wurde gegenüber der W 15126 die Breite (auf 148 mm anstatt 139 mm) und die Länge (auf 182 mm anstatt 181 mm) leicht erhöht.

c) W 12790

Vergleicht man die W 12790 mit W 15126, so unterscheiden sich diese hauptsächlich durch eine höhere Steifigkeit. Die Größe dieser beiden SZL ist relativ ähnlich, da vor allem die grundsätzlichen Abmessungen durch die Betonschwellen vorgegeben sind (siehe Abb. 3.3). Allerdings weisen sie trotzdem eine etwas geringere Breite auf (130 mm anstatt 139 mm) und unterscheiden sich in Anordnung und Tiefe der Längsrillen (hier 2 mm).

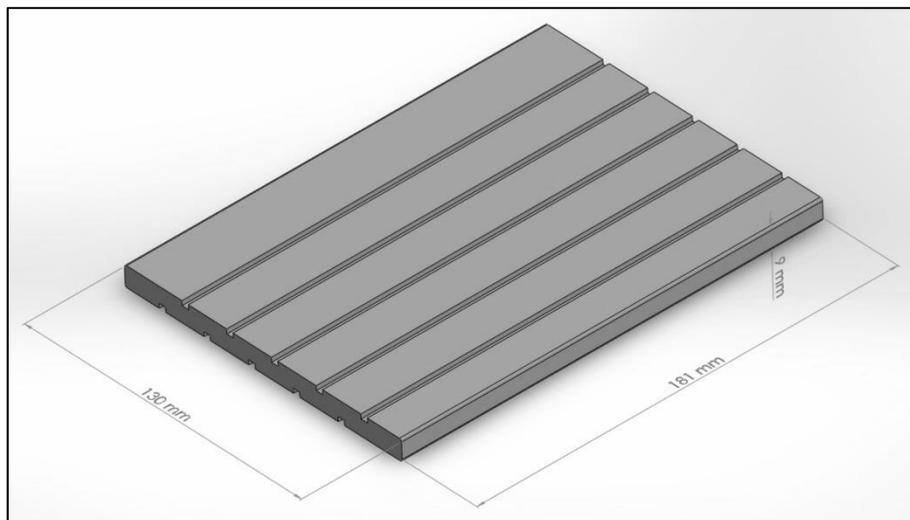


Abb. 3.3: Darstellung der W 12790 mit den grundlegenden Abmessungen.

3.3 Verwendete Prüfmaschinen und Messsysteme

Laut Vorgaben der EN 13146 müssen auf die Prüfplatten Kräfte von bis zu 110 kN aufgebracht werden, wobei durch die in Kapitel 2.6.6 beschriebene Schrägstellung diese Kräfte noch erhöht werden. Solche Kräfte bei den erforderlichen Prüffrequenzen aufzubringen erfordert enorm steife Maschinen und hohe Hydraulikdrücke bei servo-hydraulischen Maschinen. Im Folgenden sind jene Maschinen des Lehrstuhls für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe beschrieben, die diesen Anforderungen gerecht werden.

3.3.1 Bauteilprüffeld

An dem 22 Tonnen schweren und 12 Quadratmeter großen Bauteilprüffeld können (direkt am Bauteil) mehrachsige Belastungen bis 250 kN mit Belastungsfrequenzen von bis zu 50 Hz simuliert werden (siehe Abb. 3.4). Die Grundplatte des Prüffeldes ist durch 6 Luftkissen an der Unterseite der Platte pneumatisch gelagert, wodurch das Prüffeld vom Boden pneumatisch entkoppelt ist und keine Schwingungen an die Umgebung abgegeben werden können. Eine eigene Hydraulikpumpe sorgt mit einem Druck von rund 210 bar für die ausreichende Versorgung mit Öl. Der Rahmen besteht aus massiven I-Trägern die durch bis zu 30 mm dicke Stahlplatten verstärkt sind. Dadurch wird eine hohe Steifigkeit des Rahmens erreicht.

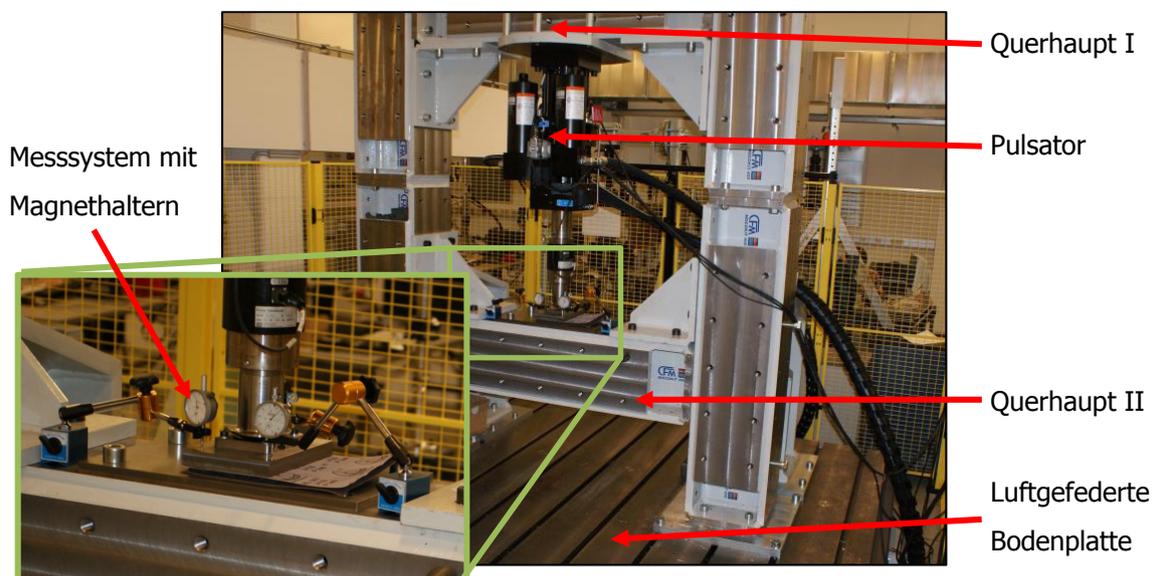


Abb. 3.4: Bauteilprüffeld mit luftgefederter Grundplatte, Stahlrahmen und Pulsator.

3.3.2 Servo-hydraulische Prüfmaschine

Um die Aussagekraft der am Prüffeld ermittelten Werte zu erhöhen wurden weitere Versuche mit einer servo-hydraulischen Prüfmaschine (MTS 322 Table Top System, Fa. MTS Systems GmbH; Berlin, D) durchgeführt. In Abb. 3.5 ist eine Detailaufnahme des Prüfaufbaus an dieser Prüfmaschine inklusive Messsystem dargestellt. Die Belastung erfolgte – wie auch am Prüffeld – kraftgesteuert im Druckbereich. Diese servo-hydraulische Prüfmaschine ist vom Belastungsbereich mit 250 kN gleich dem Prüffeld. Allerdings können an dieser Maschine Frequenzen von bis zu 100 Hz realisiert werden. Auch eine Thermokammer ist vorhanden wodurch Messungen über einen breiten Temperaturbereich (von -70°C bis +200°C) durchgeführt werden können.

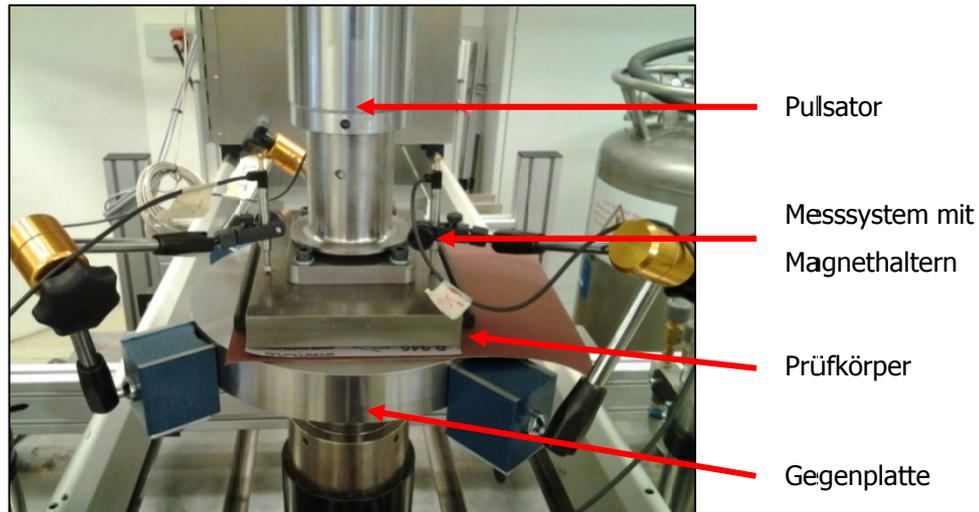


Abb. 3.5: Servohydraulische Prüfmaschine mit eingebautem Prüfkörper und externem Messsystem.

3.3.3 Externes Messsystem

Das externe Messsystem besteht aus einem Messverstärker MX 840, einem Messumwandler MX 878 und 6 bzw. 8 Linear Variable Differential Transformer (LVDT) der Type WI10 mit einer maximalen Messlänge von ± 5 mm. Abbildung 3.6 zeigt einen solchen LVDT mit den zugehörigen Abmessungen.

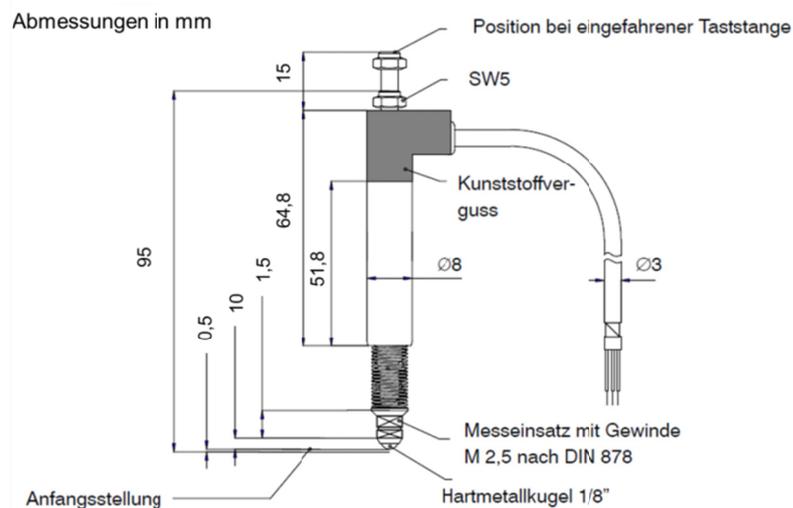


Abb. 3.6: Abmessungen eines induktiven Wegaufnehmers (HBM GmbH, 2013).

Alle Elemente des Systems wurden bei Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Deutschland, angekauft. Bei den LVDT's handelt es sich um induktive Wegaufnehmer, die bei Verschiebung des Stempels eine Potenzialänderung aufweisen.

Diese Potenzialänderung wird vom Messverstärker erkannt und einer dementsprechenden Verschiebung in Millimeter zugeordnet. Der Messumwandler wandelt das digitale Signal des Messverstärkers in ein analoges Signal um und gibt es an die Steuereinheit der Prüfmaschine weiter, die es zur weiteren Verwendung aufzeichnet und ausgibt.

3.4 Methodenentwicklung

Um den Anforderungen aus den Prüfnormen gerecht zu werden, musste einerseits ein Krafteinleitungssystem für die Bestimmung der Steifigkeiten sowohl für das Prüffeld als auch für die servo-hydraulische Prüfmaschine entwickelt werden. Andererseits wurde ein Prüfstand konstruiert und gebaut, der sowohl die geforderten Kräfte als auch die benötigten Winkeleinstellungen zulässt.

3.4.1 Entwicklung der Krafteinleitung zur Bestimmung der Steifigkeiten

Für die Bestimmung der Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen ist die Krafteinleitung ein wesentlicher Punkt um Reproduzierbarkeit und Qualität der Prüfung zu gewährleisten. Wie bereits beschrieben muss die Kraft über eine kugelförmige Oberfläche auf die Schienenzwischenlage übertragen werden. Dafür wurden 2 kugelförmige Oberflächen (konkav/konvex) mit demselben Radius erstellt, die aneinandergedrückt wie ein Kugelgelenk wirken (siehe Abb. 3.7).

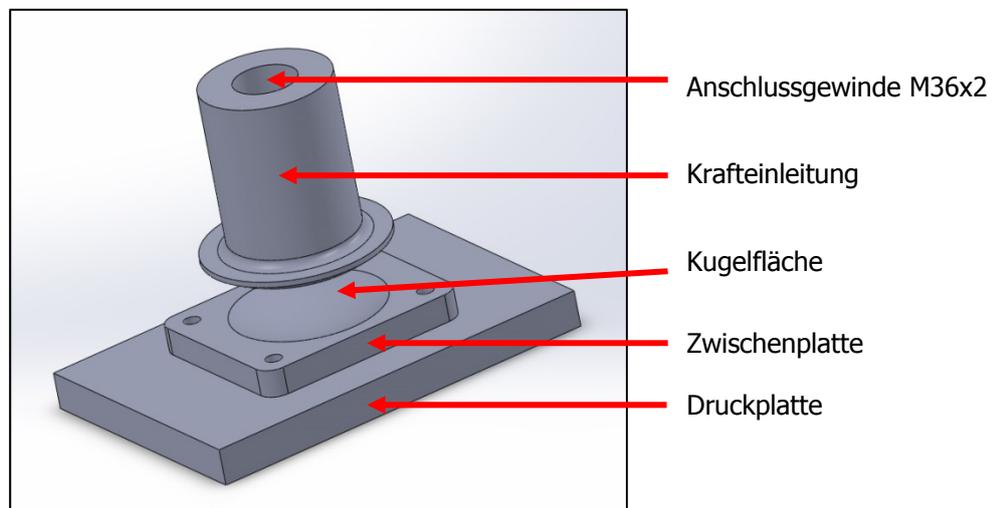


Abb. 3.7: Konstruktionsdarstellung der Krafteinleitung für die Bestimmung der Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen.

Weiters war es wichtig, dass die krafteinleitenden Platten austauschbar sind um eine möglichst hohe Flexibilität zu gewährleisten. Diese Flexibilität ist einerseits notwendig um

Elastomerplatten mit unterschiedlichen Abmessungen prüfen zu können. Andererseits ist sie für die Wartungsfreundlichkeit des Systems und den verschleißbedingten Austausch einzelner Komponenten unverzichtbar.

Da sowohl am Prüffeld als auch an der servo-hydraulischen Prüfmaschine der Einsatz eines möglichst stabilen Gegenstücks von entscheidender Bedeutung ist, wurden Stahlplatten konstruiert, die diese Stabilität gewährleisten. Die Anschlussgewinde an beiden Maschinen sind gleich, weshalb keine weiteren Adaptierungen notwendig waren.

3.4.2 Entwicklung eines Prüfstandes

Aus den beiden Normen EN 13146 und EN 13482 geht hervor, dass die Dauerversuchsprüfungen am Bauteil einigen Voraussetzungen zu unterliegen haben. Wie bereits beschrieben, mussten verschiedene Schrägstellungen des Systems möglich sein, um Kurvenfahrten zu simulieren. Eine weitere Anforderung war die Austauschbarkeit der Schwelle um auch mit anderen Schwellenformen Schienenzwischenlagen zu charakterisieren. Da die Prüfung an einer Halbschwelle mit dynamischen Belastungen bis 120 kN durchgeführt wird war es notwendig, den Prüfstand äußerst steif auszulegen. Diese hohe Steifigkeit des Prüfstandes impliziert jedoch auch ein hohes Gewicht. Aufgrund der maximalen Traglast von 1000 kg des Laborkrans, war die Versteifung nach oben begrenzt. Eine zusätzliche Anforderung war, die Ermittlung des Durchschubwiderstandes mit demselben Prüfstand durchzuführen.

Bei der erforderlicher Schrägstellung des Systems wirken mit zunehmendem Winkel immer größere Seitenkräfte auf den Hydropulser des Prüffeldes. Diese Querkräfte sollten mit Hilfe eines Querträgers vom System aufgenommen werden.

3.4.2.1 Konzept

Bei der Erstellung des ersten Konzeptes wurden alle oben beschriebenen Voraussetzungen berücksichtigt. Um ein Wegrutschen der Schwelle nach unten zu verhindern wurde ein Anschlag vorgesehen und zusätzlich noch eine Fixierung der Schwelle mit Hilfe von 2 Halterungen realisiert. In Abb. 3.8 ist das erste Konzept des Prüfstandes dargestellt, jedoch ohne den Querträger.

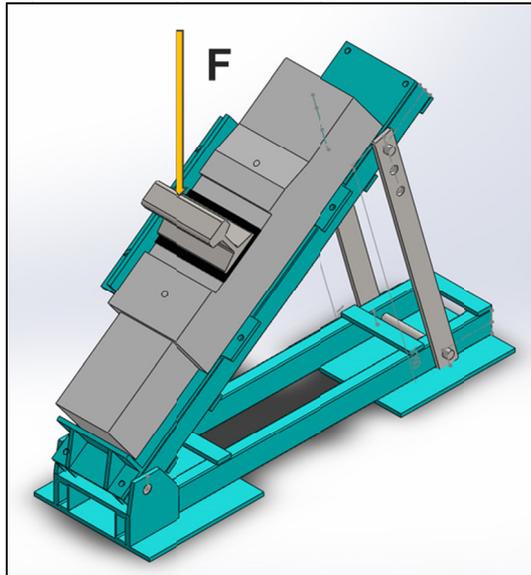


Abb. 3.8: Erstes Konzept des Prüfstandes zur Durchführung des Dauerschwingversuches nach EN 13146.

Für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes wurde die Möglichkeit vorgesehen, die Schwelle inklusive Befestigungssystem um 90° zu kippen und auf Holzunterlagen mittels Schraubzwingen zu fixieren. Dafür wurde am oberen Träger ein seitlicher Anschlag konstruiert, der in Abb. 3.8 zu sehen ist. In Abstimmung mit Semperit Technische Produkte GmbH wurde das Konzept hierbei so gestaltet, dass die Ermittlung des Durchschubwiderstandes nicht mittels Zug- sondern Druckbelastung durchgeführt wird (siehe Abb. 3.9). Aus diesem Grund musste auch eine Stempelverlängerung zur Einleitung der Kraft vorgesehen werden.

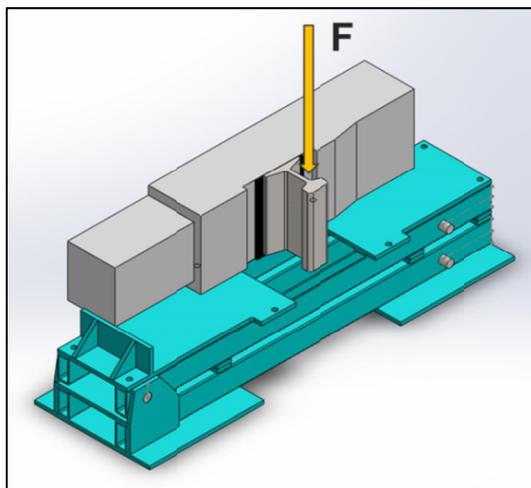


Abb. 3.9: Konzept für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes am Prüfstand.

Anhand dieses Konzepts wurden die groben Abmessungen mit den Einbaumaßen am Prüfstand verglichen. Beim Vergleich wurde festgestellt, dass der Prüfstand in dieser Form nicht im Bauteilprüffeld montiert werden kann, weshalb einige Änderungen am Konzept durchgeführt und bei der anschließenden mechanischen Auslegung berücksichtigt wurden.

3.4.2.2 Mechanische Auslegung

Ausgehend vom Konzept wurde nun die mechanische Auslegung des Prüfstandes durchgeführt. Für diese wurden folgende Voraussetzungen angenommen:

- Vertikale Kräfte bis 120 kN
- Winkelstellungen zwischen 25° und 45°
- Querkräfte bis 60 kN bei 45° Schrägstellung
- Gewicht < 1000 kg
- Dynamische Belastung mit 4 Hz
- Länge der Halbschwelle ca. 1300 mm
- Maximale Einbauhöhe im Prüffeld

Der kritischste Teil am Prüfstand ist der schräggestellte obere Teil. Daher wurde die Berechnung hauptsächlich daran durchgeführt. Zur Visualisierung der auftretenden Kräfte ist in Abb. 3.10 der freigeschnittene obere Träger dargestellt. Die eingeleitete Kraft F entwickelt im Punkt C auf Grund der Entfernung h_1 des Angriffspunktes vom Träger zusätzlich ein Moment. Auch die Gewichtskraft F_G (im Punkt D) entwickelt mit dem Abstand h_2 ein Moment in dieselbe Richtung. Aufgefangen werden diese Kräfte und Momente durch die Auflagerkräfte F_A und F_B , die in den Bolzenlagerungen wirken.

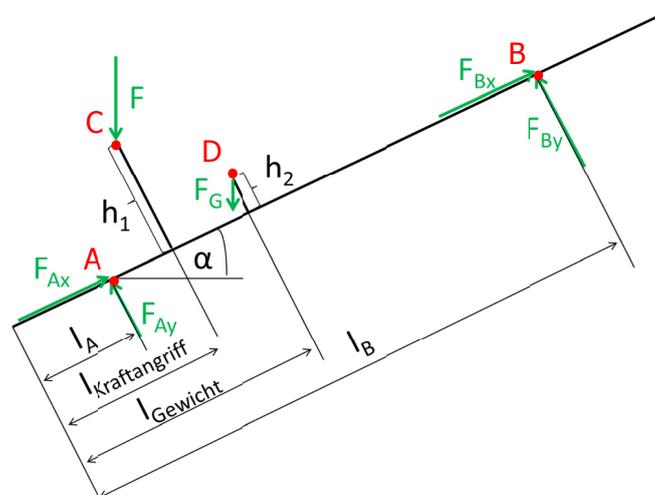


Abb. 3.10: Freigeschnittener Träger für die mechanische Auslegung.

Mechanische Auslegung oberen Trägers

Zunächst wurden die Auflagerkräfte an den Stellen A und B mit Hilfe der Kräfte- und Momentengleichgewichte aus der Statik (Gleichungen 3.1 bis 3.3) ermittelt. Zur Berücksichtigung der dynamischen Belastungen wurde mit einer Sicherheit von 3,5 gerechnet.

$$\sum F_x = 0 \quad (3.1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (3.3)$$

Ausgehend von den daraus errechneten Belastungen wurden I-Träger mit der Bezeichnung IPB 160 ausgewählt. Anschließend wurde das Trägheitsmoment des gesamten oberen Trägers mit Hilfe des Schwerpunktes z_s (Gleichung 3.4) und der Querschnittsfläche A des Trägers ermittelt.

$$z_s = \int_A z dA \quad (3.4)$$

Da ein Versagen des Trägers an der Stelle mit der größten Biegebelastung eintreten würde, musste das maximale Biegemoment M_{bmax} sowie die dazugehörige Stelle am Träger berechnet werden. Mit den zuvor ermittelten Trägheitsmomenten I und dem maximalen Biegemoment $M(x)$ konnte nun die maximale Durchbiegung $w(x)$ am Träger durch Integration der Biegelinien-Differentialgleichung 2. Ordnung errechnet werden (Gleichung 3.5). Der für diese Differentialgleichung notwendige Elastizitätsmodul E wurde aus Tabellenbüchern ermittelt.

$$\sum_i (E_i I_i) * w_{II}(x) = -M(x) \quad (3.5)$$

Die maximale Durchbiegung durfte 0,1 mm nicht überschreiten damit eine ausreichende Steifigkeit gegeben war. Um den gesamten Bereich der geforderten Schrägstellungen abzudecken wurde die Auslegung sowohl bei 25° als auch bei 45° durchgeführt.

Auslegung der Bolzen

Da die beiden Bolzen an Stelle A und B die gesamte Belastung aufnehmen mussten wurden diese mit höherer Sicherheit ausgelegt. Hauptaugenmerk wurde hierbei auf die Abscherung gelegt. Mit Gleichung 3.6 wurde der erforderliche Durchmesser d_{erf} berechnet,

wobei τ_{zul} die zulässige Abscherspannung für dynamische Beanspruchung ist und aus Tabellenbüchern ermittelt wurde.

$$d_{erf} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{max}}{2 \cdot \pi \cdot \tau_{zul}}} \quad (3.6)$$

Auslegung der Abstützungen

Die Auslegung der Abstützungen erfolgte einerseits auf Knicken und andererseits auf Zug, da diese, je nach Schrägstellung entweder auf Druck oder auf Zug belastet werden. Für die Beanspruchung auf Knicken wurden die Euler'schen Knickformeln herangezogen (Gleichung 3.7), wobei L die jeweilige Länge der Abstützung und F_K die maximale Knickkraft darstellt.

$$F_K = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{0,5 \cdot L^2} \quad (3.7)$$

Die Berechnung auf Zug erfolgte mit den Gleichung 3.8 und 3.9. Die zulässige Spannung σ_{zul} wurde wieder aus Tabellenbüchern ermittelt. A_{erf} definiert die erforderliche Querschnittsfläche der Abstützung und F_{max} die maximale Kraft auf den Bolzen. Aus dieser Beziehung konnte A_{erf} und in weiterer Folge der Bolzendurchmesser errechnet werden.

$$A_{erf} = \frac{F_{max}}{\sigma_{zul}} \quad (3.8)$$

$$d_{erf} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{erf}}{\pi}} \quad (3.9)$$

Auslegung des Querträgers

Da der Querträger bei genauer Betrachtung ein einfacher, symmetrischer Biegeträger mit zentrischer Belastung ist, erfolgte die Auslegung mit den oben bereits beschriebenen Kräfte- und Momentengleichgewichte sowie der Biegelinien-Differentialgleichung 2. Ordnung.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse aller Berechnungen würde den Umfang dieser Masterarbeit sprengen. Aus diesem Grund befindet sich die ausführliche Berechnung im Anhang.

3.4.2.3 Konstruktion

Ausgehend von den in Kapitel 3.4.2.2 beschriebenen mechanischen Auslegungen wurde im Anschluss die Konstruktion des Prüfstandes durchgeführt. Hierfür wurde das Programm SolidWorks (Fa. Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, Massachusetts, USA) verwendet.

Abbildung 3.11 zeigt die fertige Konstruktion inklusive Querträger mit einer Schrägstellung von 33° . Um einen bedienerfreundlichen Zusammenbau zu gewährleisten wurde die Befestigung des Querträgers einerseits direkt am Prüfstand andererseits am Boden des Prüffeldes realisiert.

Weiters musste die Möglichkeit berücksichtigt werden, den Prüfstand mit dem Deckenkran zu bewegen, was mit 4 Trageösen gelöst wurde. In diesem Zusammenhang wurde auch das voraussichtliche Gesamtgewicht des Prüfstandes überprüft. Laut interner Berechnung des Programms SolidWorks über Volumen und Dichte des Prüfstandes liegt das Gewicht unter 900 kg.

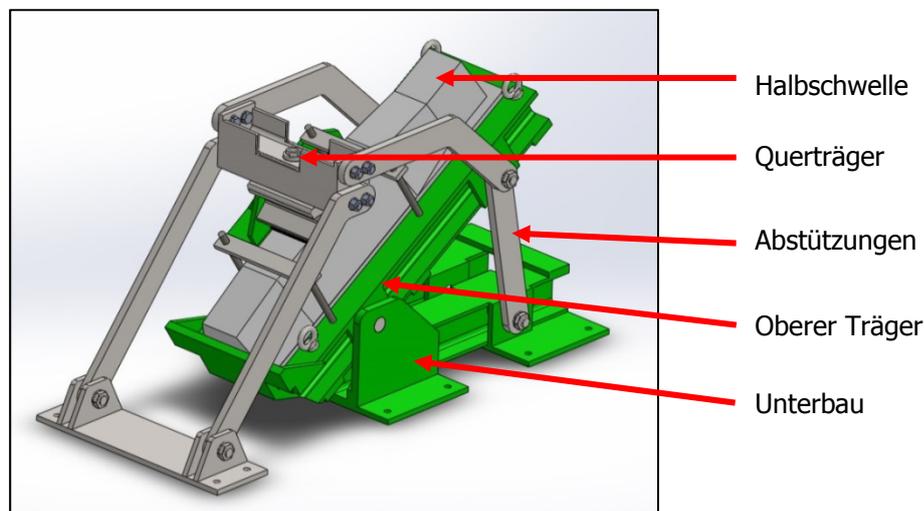


Abb. 3.11: Konstruktion des Prüfstandes inklusive Querträger.

Für die Krafteinleitung wurde ein Adapterstück konstruiert, das den Anforderungen der Norm entspricht. In Abb. 3.12 ist die Krafteinleitung inklusive Schwalbenschwanzführung dargestellt. Dieses Adapterstück weist an der Unterseite einen Krümmungsradius auf, der größer ist als der Krümmungsradius der Fahrkante der Schiene was eine Linienbelastung gewährleistet. Zusätzlich wurde eine Schwalbenschwanzführung konstruiert, die einerseits den seitlichen Versatz der Krafteinleitung ausgleicht, andererseits eine Austauschbarkeit

ermöglichen soll. Die zylindrische Fläche am Adapterstück wird mittels Gleitlager geführt, der Sechskant an der Oberseite dient zur besseren Fixierung am Hydropulser.

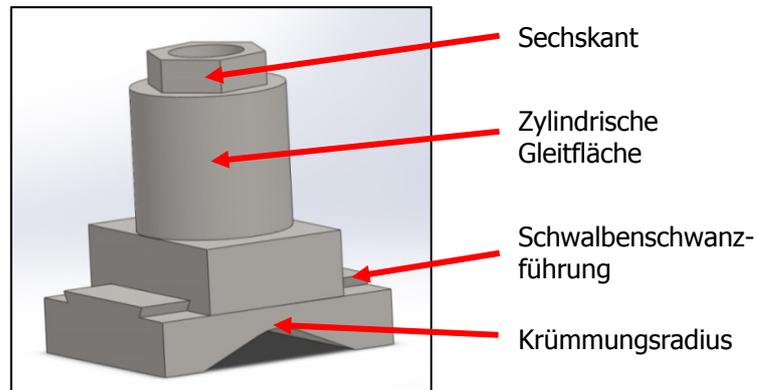


Abb. 3.12: Adapterstück für Krafteinleitung mit Schwalbenschwanzführung.

Wie bereits beschrieben musste für Einleitung der Kraft bei der Bestimmung der statischen Steifigkeit am Befestigungssystem sowie für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes eine Stempelverlängerung konstruiert werden. Um auch hier wieder größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten, wurde ein auswechsel- und verdrehbarer Adapter an der Unterseite des Stempels vorgesehen, der eine Ausnehmung für den Schienenkopf aufweist (siehe Abb. 3.13).

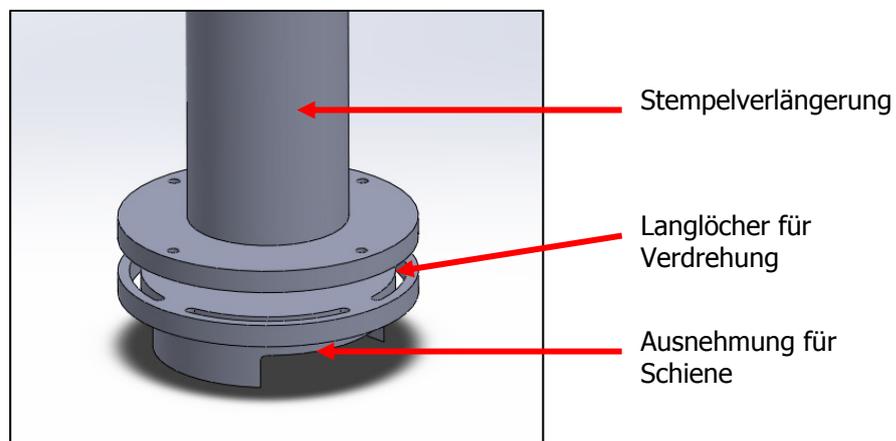


Abb. 3.13: Stempelverlängerung und Adapterstück für Krafteinleitung bei Durchschubwiderstand und statischer Steifigkeit des Befestigungssystems.

Eine detaillierte Darstellung aller Konstruktionen und Einzelteilzeichnungen würde den Umfang dieser Masterarbeit sprengen. Aus diesem Grund wurden diese ebenfalls in den Anhang verschoben.

3.4.2.4 Simulation der Spannungen am Prüfstand

Nach erfolgter Konstruktion wurden die Spannungen im Prüfstand durch Simulation mit SolidWorks überprüft. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurde versucht, die Bedingungen in der Simulation so realitätsgetreu wie möglich darzustellen. Wichtig waren hierbei vor allem die Bedingungen für Einspannung sowie Komponentenkontakte.

Die Bodenplatte sowie der Querträger wurden fixiert, wodurch die Abstützungen des Querträgers aus der Simulation genommen werden konnten. Weiters wurden sowohl die Kontakte zwischen den Bolzen und den Abstützungen als auch die Flächen rund um die Krafteinleitung als Gleitflächen angenommen. Aus hinreichender Genauigkeit wurden alle anderen Kontaktflächen als fest verbunden angenommen. Die Krafteinleitung erfolgte über die obere Fläche des Adapterstückes in vertikaler Richtung.

In Abb. 3.14 ist das Ergebnis der Vergleichsspannung nach Mises im Prüfstand dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass die größten Belastungen des Prüfstandes rund um die Bolzen auftreten. Allerdings bleiben diese Vergleichsspannungen mit rund 25 N/mm² deutlich unter dem zulässigen Wert von 60 N/mm².

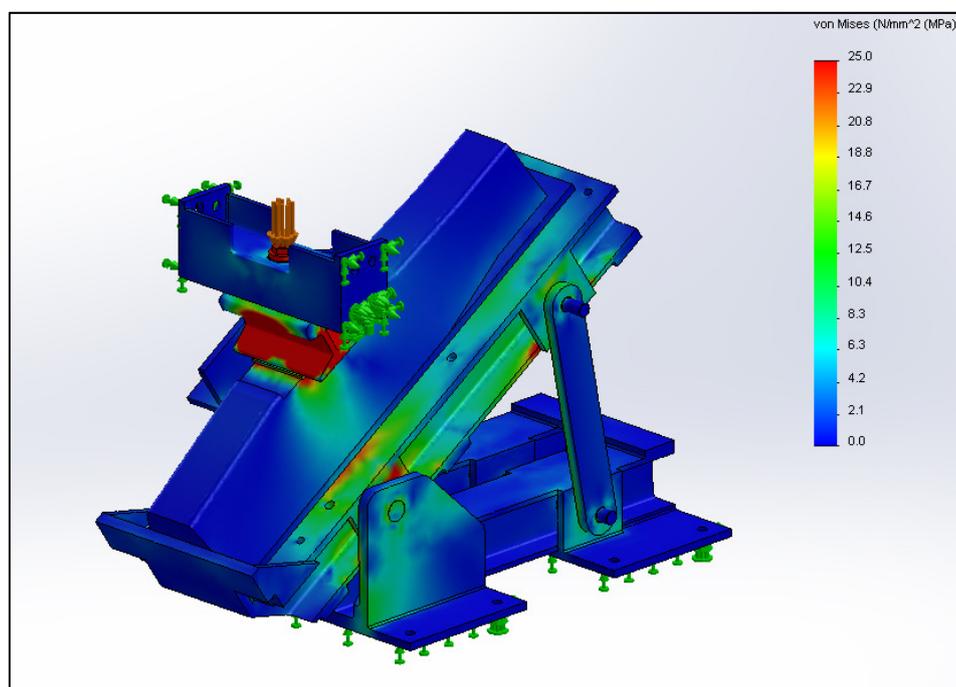


Abb. 3.14: Simulationsergebnis der Vergleichsspannung nach Mises am Prüfstand.

Da der Rechenaufwand für eine dynamische Berechnung zu hoch gewesen wäre, wurde die Simulation statisch durchgeführt. Allerdings wurde, wie auch bei der mechanischen Auslegung, eine dynamische Sicherheit von 3,5 berücksichtigt.

3.5 Adaptierungen aufgrund auftretender Probleme

Nach den ersten Versuchen traten bereits einige Probleme auf. So mussten einerseits Schwierigkeiten bei der Auswertung der ankommenden Signale in den Griff bekommen werden, andererseits mussten einige Fehlerbehebungen und konstruktive Änderungen am Prüfstand durchgeführt werden.

3.5.1 Signalaufnahme und -auswertung

Für die Ermittlung der Steifigkeiten an SZL wurden die LVDT's mit Magnethaltern direkt am Querhaupt befestigt um eine mögliche Durchbiegung des Querhauptes zu umgehen. Die Signale der LVDT's wurden über den Messverstärker zu einem PC geleitet, dort verarbeitet und über einen Messumwandler an die Software des Prüffeldes weitergeleitet (siehe Abb. 3.15). Bei dieser Anordnung entstand allerdings eine zusätzliche Phasenverschiebung zwischen dem Signal der maschineninternen Sensoren und den Signalen der LVDT.

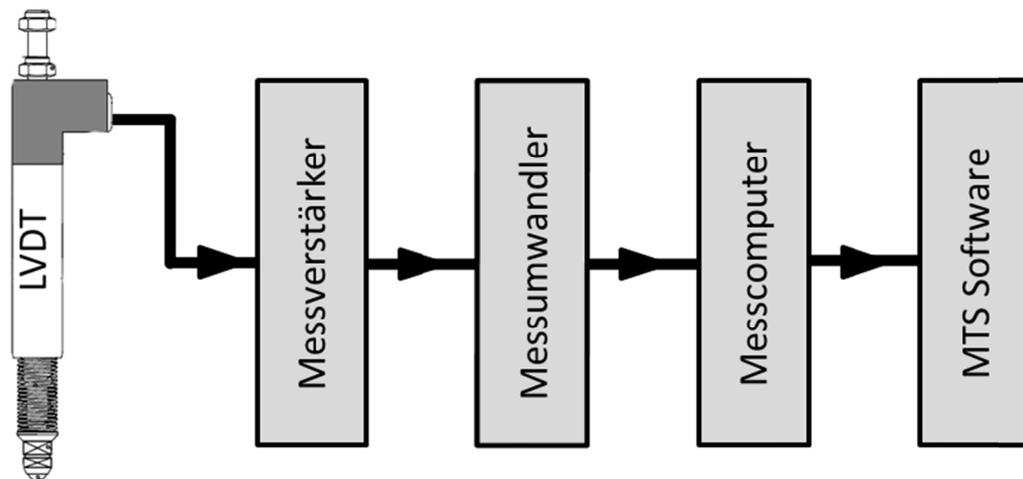


Abb. 3.15: Schematische Darstellung der Signalaufbereitung von LVDT's.

Zusätzlich erfuhren die Magnethalter auf Grund der unterschiedlichen Prüffrequenzen eine dynamische Belastung, wodurch ein Spiel im Gelenk entstand das in weiterer Folge die Messwerte beeinflusste. Deshalb wurde eine Halterung konstruiert, die stabil am Querhaupt stand und drei LVDT's um 120° versetzt aufnehmen konnte (siehe Abb. 3.16). Mit dieser LVDT-Halterung wurde die Messungenauigkeit minimiert und es konnten reproduzierbare Messwerte für die Steifigkeiten ermittelt werden.

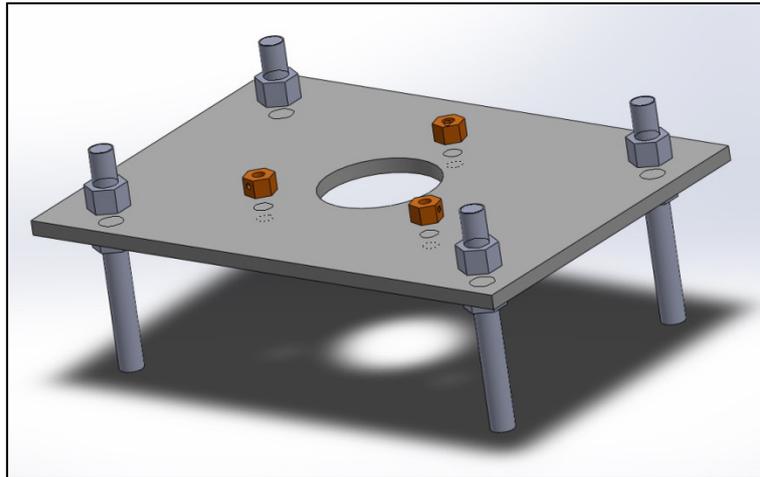


Abb. 3.16: Konstruktive Lösung der LVDT-Halterung.

3.5.2 Durchschubwiderstand

Für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes wurde, wie bereits beschrieben, die Halbschwelle inklusive Befestigungssystem um 90° seitwärts gekippt und mittels Schraubzwingen auf Holzunterlagen fixiert. Leider waren diese Holzunterlagen stark unterdimensioniert, was eine Verdrehung der Schwelle zur Folge hatte und die Messwerte unbrauchbar machte. Aus diesem Grund wurden neue Holzhalterungen aus Hartholz erstellt und genau an die Schwellenform angepasst (siehe Abb. 3.17).

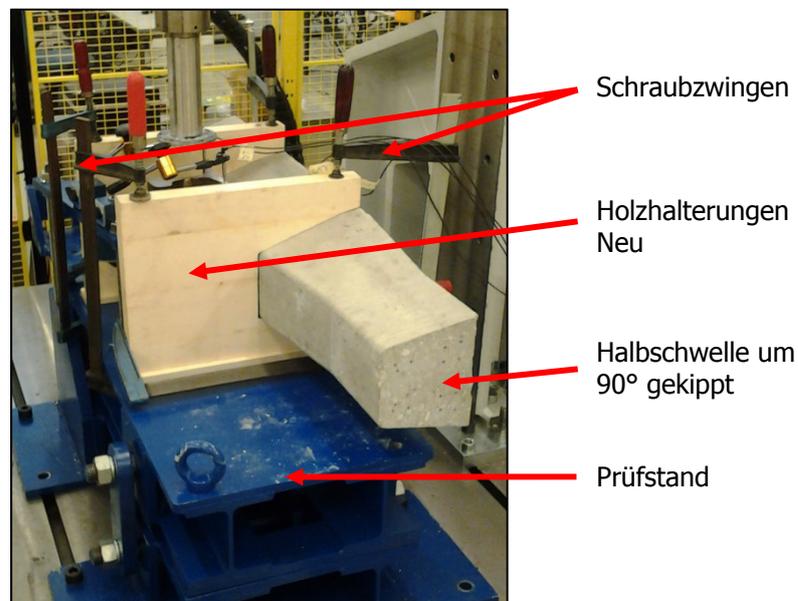


Abb. 3.17: Prüfanordnung zur Ermittlung des Durchschubwiderstandes.

Zusätzlich wurden zur besseren Fixierung noch weitere Schraubzwingen angebracht. Mit diesen neuen Halterungen wurde die Verdrehung der Schwelle minimiert und plausible Messwerte ermittelt.

3.5.3 Statische Steifigkeit des Befestigungssystems

Bei der Bestimmung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems mussten ebenfalls Adaptierungen durchgeführt werden. Die in Kapitel 2.6.6 beschriebene Anpassung der Schienenhöhe wurde mit einer CNC-Fräsmaschine realisiert, wodurch eine allfällige leichte Schrägheit über die Schienenlänge kompensiert wurde. Durch diese Nacharbeit mit einer CNC-Fräsmaschine konnten gleichmäßige Einsenkungen über die Schienenlänge gewährleistet werden.

Aufgrund einer Vorneigung der Auflagefläche für die Schiene an der Halbschwelle musste zusätzlich der Prüfstand leicht schräggestellt werden, um die Krafteinleitung senkrecht auf die Schienenunterseite aufzubringen, was mit einem Stahlkeil als Distanzstück erreicht wurde.

3.5.4 Dauerschwingversuch

Bevor die ersten Messungen am Prüfstand durchgeführt wurden, war es notwendig etwaige Probleme bei der späteren Messung vorab zu ermitteln. Aus diesem Grund wurde zuerst die seitliche Verschiebung des Stempels mit und ohne Querträger mit Hilfe eines optischen Wegmesssystems ermittelt sowie eine kurzzeitige dynamische Belastung aufgebracht. Für diese Messungen wurde der Prüfaufbau nach Abb. 2.24 (Seite 32) mit einem Winkel von 33° realisiert, da unter diesem Winkel später die dynamische Belastung durchgeführt wurde. Die Vorversuche erfolgten an der ZW 700 – Testplatte um die zu prüfenden Platte nicht zu beschädigen.

3.5.4.1 Stempelverschiebung bei statischer Belastung

Nach Herstellen des Prüfaufbaus wurde ein optisches Wegmesssystem zwischen Prüfstand und Rahmen aufgebaut und kalibriert. Aus Platzgründen musste das Messsystem auf dem Kopf stehend aufgebaut werden. Die erste Messung erfolgte ohne Querträger.

In Abb. 3.18 sind die Verschiebungen des Stempels in alle 3 Raumrichtungen bei Belastung bis 75 kN dargestellt, wobei Displ. X die horizontale, Displ. Y die vertikale Verschiebung und Displ. Z die Verschiebung in Tiefenrichtung darstellt. Aus dieser Messung geht hervor, dass die Schwalbenschwanzführung bereits bei der kleinsten

Belastung verkantet und der Stempel als Ganzes um annähernd 3 mm seitlich ausweicht. Diese horizontale Verschiebung ist auf die Durchbiegung des Stempels zurückzuführen und nach Rücksprache mit Fa. MTS Systems GmbH für den Pulsator eine zu große Belastung.

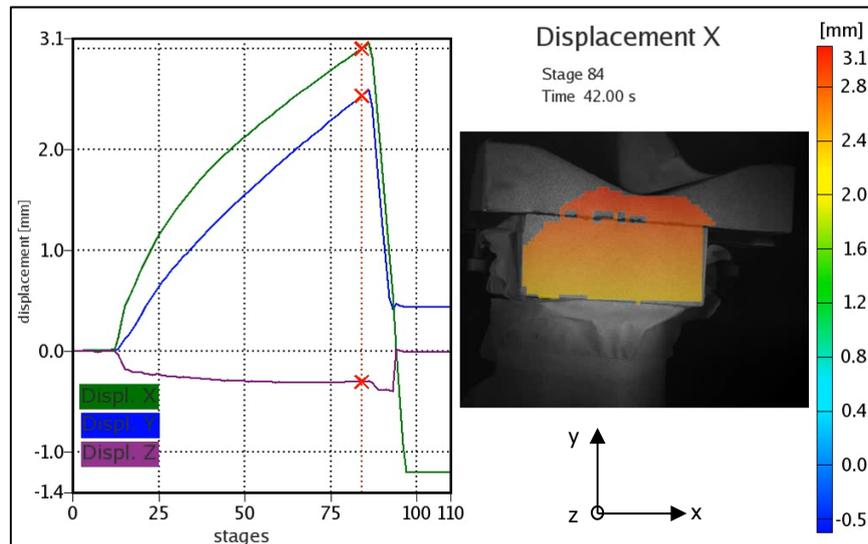


Abb. 3.18: Messung der Stempelverschiebung in alle 3 Raumrichtungen.

Zur besseren Darstellung dieser Messung wurde ein Video der Stempelverschiebung erstellt. Dieses Video kann mit nebenstehendem QR-Code aufgerufen werden (http://youtu.be/i1Kyoei3_2k, 2013).



Nach Einbau des Querträgers wurde eine neuerliche Messung der Stempelverschiebung durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Verschiebung des Stempels auf unter 0,3 mm reduziert werden konnte und somit der Einsatz des Querträgers legitimiert war.

3.5.4.2 Bewegung des Prüfstandes bei dynamischer Belastung

Nachdem die Stempelverschiebung bei statischer Belastung minimiert wurde, konnte ein erster dynamischer Probelauf gestartet werden. Hierfür wurde eine Belastung von 95 kN bei einer Frequenz von 4 Hz aufgebracht.

Bereits nach dem ersten Einschalten wurde eine starke Bewegung des Prüfstandes festgestellt. Mit Hilfe des nebenstehenden QR-Codes kann ein Video der Bewegung am Prüfstand aufgerufen werden (<http://youtu.be/9jBUTNRYKAo>, 2013).



Der erste Versuch zeigte, dass die Einsenkung der Schiene an der SZL zu gering war. Erklärbar ist dies mit Hilfe von Abb. 3.19. Wie hier gut zu erkennen ist, sitzt die Kraftmessdose des Hydropulsers oberhalb des Querträgers und nur die Krafteinleitung wird im Querträger geführt. Auf Grund dieser Anordnung wurde ein großer Teil der aufgebracht und mittels Kraftmessdose bestimmten Belastung über den Querträger und die vorderen Halterungen in den Boden abgeleitet (siehe Abb. 3.19, links). Zusätzlich entstand durch die hinteren Halterungen eine Zugkraft auf den Prüfstand, was eine Drehbewegung über den Gelenkbolzen zur Folge hatte (siehe Abb. 3.19, rechts).



Abb. 3.19: Darstellung der Bewegung des Prüfstandes bei dynamischer Belastung.

Die Bewegungen des Prüfstandes wurden durch Anbringung von mehreren LVDT's an verschiedenen Stellen gemessen (siehe Abb. 3.20), wodurch die bereits beschriebene Drehbewegung um den Gelenkbolzen nachgewiesen werden konnte.

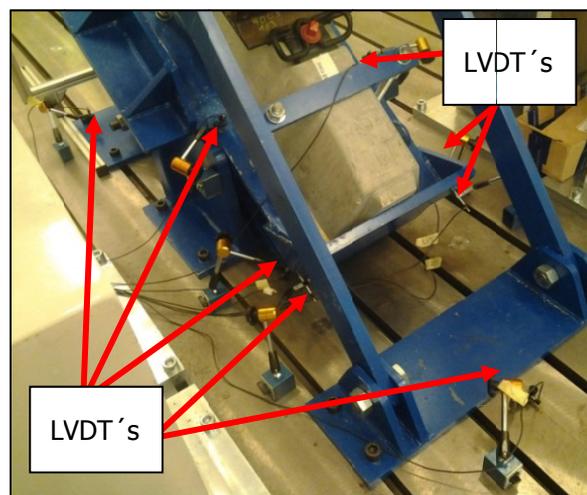


Abb. 3.20: Anordnung der LVDT's zur Messung der Bewegung des Prüfstandes.

Um diese Drehbewegung zu minimieren wurden zuerst einige Schweißnähte am Prüfstand nachgebessert und eine Abstützung des Gelenksbolzens in der Mitte des Prüfstandes konstruiert, die eine mögliche Durchbiegung des Bolzens unterbinden sollte und in Abb. 3.21 dargestellt ist. Weiters wurden unter der vorderen Kante zwei Abstützungen aus gedrehten Stahlteilen platziert und verspannt.

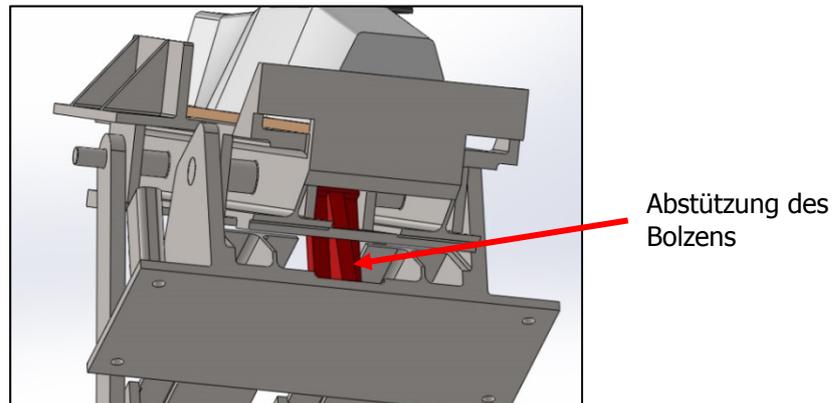


Abb. 3.21: Anordnung und Form der zusätzlichen Bolzenabstützung am Prüfstand.

Nach Beendigung des ersten durchgehenden Versuchsablaufes wurde zusätzlich der Querträger neu konstruiert und durch einen am Prüffeldrahmen montierten Querträger ersetzt (siehe Abb. 3.22). Zur Messung der wahren Kräfte wurde die Kraftmessdose unterhalb des neuen Querträgers und somit direkt an der Krafteinleitung montiert. Auch die Krafteinleitung wurde geändert und die lineare Schwalbenschwanzführung durch eine drehende Gleitführung ersetzt.

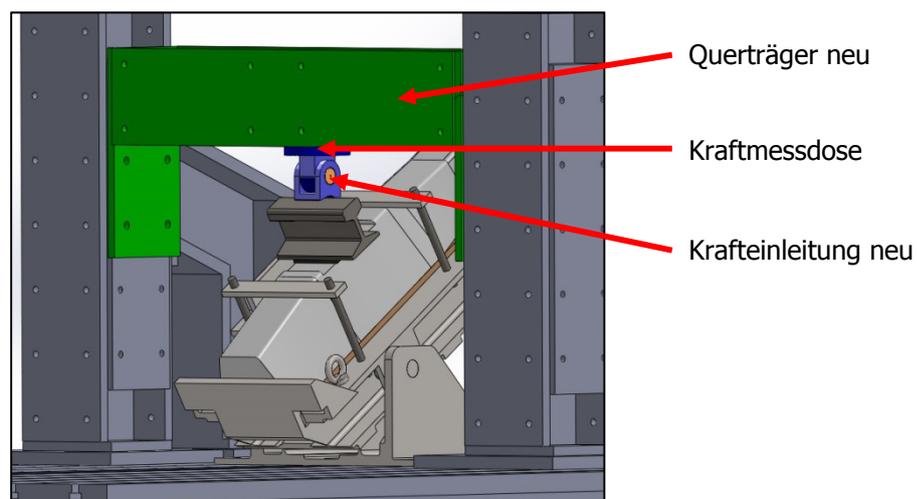


Abb. 3.22: Konstruktionszeichnung des neuen Querträgers sowie Anordnung der Kraftmessdose und der neuen Krafteinleitung.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Bestimmung der Steifigkeiten im unverbauten Zustand sowie einige Einflüsse auf die Messungen eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse aus den Versuchen am Prüfstand dargestellt und diskutiert. Zum Abschluss erfolgt eine Verifizierung der Ergebnisse mit Werten von anderen Prüfinstitutionen.

4.1 Ergebnisse aus der Bestimmung der Steifigkeiten am Bauteilprüffeld

Für die Ermittlung der Steifigkeit an Schienenzwischenlagen wurden die einzuleitenden Kräfte aus Tabelle 2.1 ermittelt, wobei für die Kategorie C eine minimale Kraft F_{SP1} bzw. F_{LFP1} von 18 kN und eine maximale Kraft F_{SPmax} bzw. F_{LFPmax} von 85 kN angenommen wurden. Daraus wurde eine obere Kraft F_{SP2} bzw. F_{LFP2} von 68 kN errechnet. Für die Ermittlung der Steifigkeiten nach Kategorie E wurde eine minimale Kraft F_{SP1} bzw. F_{LFP1} von 20 kN sowie eine maximale Kraft F_{SPmax} bzw. F_{LFPmax} von 109 kN ermittelt. Daraus ergab sich eine obere Kraft F_{SP2} bzw. F_{LFP2} von 95,2 kN.

Ausgehend von diesen Kraftwerten wurden die Versuche, wie in den Kapiteln 2.6.1 und 2.6.2, beschrieben durchgeführt. Die Bestimmung der statischen sowie der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit haben laut EN 13146 den gleichen Aufbau. Bei der Bestimmung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit werden zudem ausreichend Einschwingzyklen gefahren. Darauf basierend wurden die statische sowie die dynamisch, niederfrequente Steifigkeit bei den drei vorgegebenen Prüffrequenzen in einem Versuch mit einer Ruhezeit von jeweils 1 min zwischen den Prüfungen durchgeführt.

Der Prüfaufbau wurde, wie in Abb. 4.1 beschrieben, hergestellt und eine Prozedur mit den erforderlichen Parametern in der Bedienersoftware des Bauteilprüffeldes implementiert. Die in dieser Abbildung ersichtlichen Messuhren wurden lediglich als zusätzliche Visualisierung für die Messung der Einsenkung an diesen Stellen dargestellt. Bei den Versuchen wurde jedoch das beschriebene externe Messsystem verwendet.

Für die Ermittlung der Steifigkeiten wurden von Fa. Semperit Technische Produkte GmbH die in Tabelle 4.1 aufgezeigten Schienenzwischenlagen zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurde von jeder Prüfkörperform eine Testplatte zu Versuchszwecken mitgeliefert.

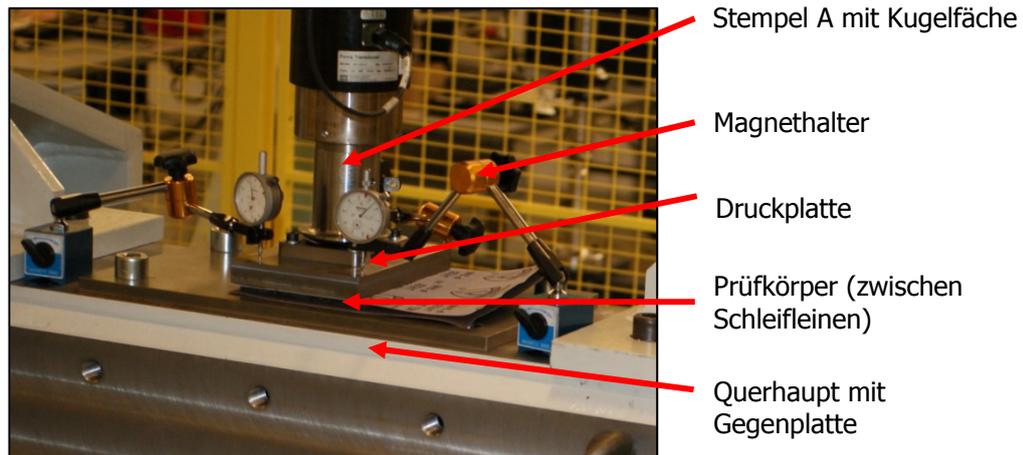


Abb. 4.1: Darstellung des Prüfaufbaus am Prüffeld zur Ermittlung der Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen.

Die ersten Ergebnisse aus den Versuchen sind ebenfalls in Tabelle 4.1 dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die ZW 700 weicher ist als die anderen SZL. Die Werte für die W 12790 sind sogar annähernd 3mal so hoch wie die der ZW 700, was zum Teil auch auf die höheren Belastungen der Kategorie E zurückzuführen ist. Auch ist ein Anstieg der Steifigkeiten von k_{SP} bis k_{LFP} bei 20 Hz zu erkennen, was auf die bereits beschriebene dynamische Versteifung zurückgeführt werden kann. Innerhalb einer Prüfkörperform weichen die Steifigkeiten jedoch nur wenig voneinander ab, was auf eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche hinweist.

Tabelle 4.1: Auflistung der Prüfplatten inklusive der zu prüfenden Kategorie.

Nr.	Bezeichnung	Kat.	k_{SP} [kN/mm]	k_{LFP} [kN/mm] bei		
				5 Hz	10 Hz	20 Hz
1	ZW 700 – Probe 1	C	87,6	94,4	94,4	96,0
2	ZW 700 – Probe 2	C	89,0	94,3	93,7	95,4
3	W 15126 – Probe 1	C	98,1	128,7	135,0	142,6
4	W 15126 – Probe 2	C	96,3	127,3	133,4	142,1
5	W 15126 – Probe 3	C	99,7	131,7	136,6	144,9
6	W 15127 – Probe 1	C	107,4	142,9	149,0	159,5
7	W 15127 – Probe 2	C	106,9	143,1	150,0	160,4

8	W 15127 – Probe 3	C	107,3	144,7	151,5	161,1
9	W 12790 – Probe 1	E	286,1	372,1	387,9	402,2
10	W 12790 – Probe 2	E	292,9	382,9	392,0	412,5
11	W 12790 – Probe 3	E	281,0	370,3	381,8	399,4
12	W 12790 – Probe 4	E	237,5	307,1	317,7	332,8
13	W 12790 – Probe 5	E	240,3	312,9	322,0	337,5

Um die Steifigkeit ermitteln zu können, wurden die Kraft-Verformungskurven der einzelnen Platten ausgewertet. In den folgenden Abbildungen sind die Kurven unter statischer (siehe Abb. 4.2) bzw. dynamischer, niederfrequenter Belastung (siehe Abb. 4.3) der ZW 700 – Probe 1 beispielhaft dargestellt. Die Kurvenform bei der statischen Belastung war gleichmäßig und somit die Steifigkeiten zwischen 18 und 68 kN sehr gut auswertbar. Bei genauerer Betrachtung der Kurven fällt eine starke Nichtlinearität bei der Form der Kurven auf, was bei Elastomeren üblich und auf eine Verfestigung mit steigender Belastung zurückzuführen ist.

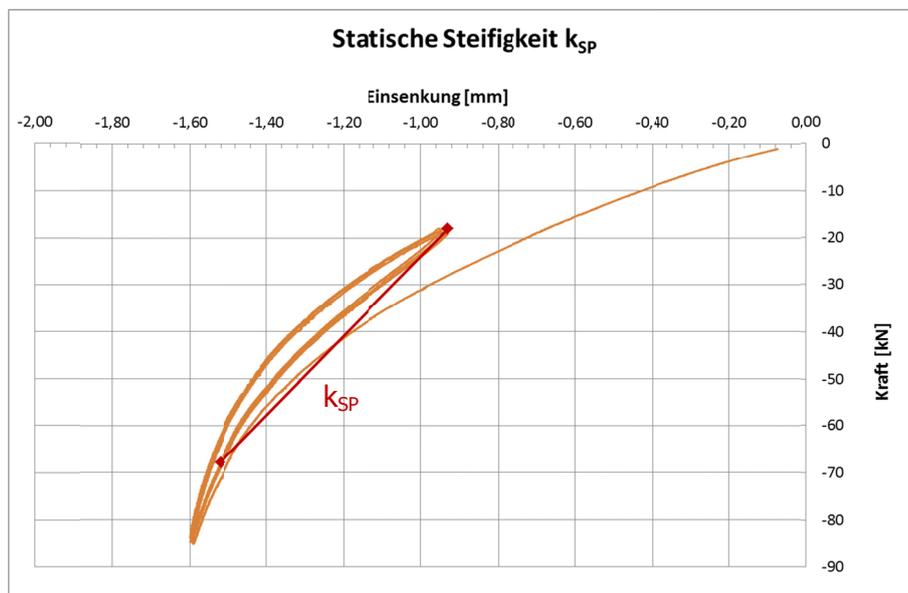


Abb. 4.2: Kraft-Verformungskurven zur Ermittlung der statischen Steifigkeit der ZW 700.

Wie in Abb. 4.3 dargestellt zeigten die Kurven bei dynamischer, niederfrequenter Belastung mit steigender Prüffrequenz eine zunehmende „Kartoffelform“. Auch die Kurven der anderen Prüfplatten wiesen ähnliche Formen auf. Allerdings wurde auf die Darstellung

dieser hier verzichtet. Diese Form der Kraft-Verformungskurven ist auf die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Messverzögerung zurückzuführen.

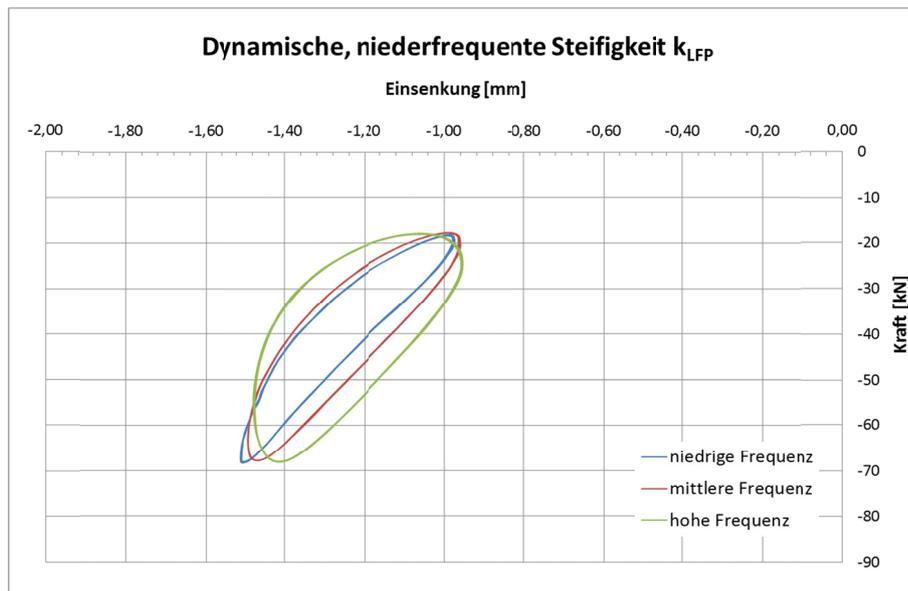


Abb. 4.3: Kraft-Verformungskurven zur Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700.

Im Laufe der Prüfungen wurde festgestellt, dass die Gelenke der Magnethalter für Belastungsfrequenzen bis 20 Hz nicht ausgelegt sind. Dies spiegelte sich in einer Bewegung der Gelenke bei der dynamischen, niederfrequenten Belastung wieder, wodurch die ermittelten Messwerte um bis zu 10 % zu hoch waren. Um die Genauigkeit der Messwerte zu erhöhen, wurden deshalb die Versuche mit der in Kapitel 3.5.1 beschriebenen LVDT-Halterung wiederholt und die finalen Ergebnisse in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Prüfplatten inklusive der zu prüfenden Kategorie nach Berücksichtigung der Messverzögerung.

Nr.	Bezeichnung	Kat.	k_{SP} [kN/mm]	k_{LFP} [kN/mm] bei		
				5 Hz	10 Hz	20 Hz
1	ZW 700 – Probe 1	C	83,9	90,2	90,0	91,9
2	ZW 700 – Probe 2	C	82,4	88,5	87,9	89,7
3	W 15126 – Probe 1	C	88,8	116,0	122,8	131,5

4	W 15126 – Probe 2	C	89,6	116,9	123,6	132,8
5	W 15126 – Probe 3	C	89,6	115,6	122,5	130,8
6	W 15127 – Probe 1	C	96,4	128,8	136,4	146,3
7	W 15127 – Probe 2	C	97,8	128,9	136,6	146,7
8	W 15127 – Probe 3	C	97,9	129,8	137,7	147,6
9	W 12790 – Probe 1	E	258,6	327,9	344,2	367,0
10	W 12790 – Probe 2	E	257,5	327,0	344,5	364,3
11	W 12790 – Probe 3	E	259,9	328,2	347,1	368,8
12	W 12790 – Probe 4	E	214,8	271,8	284,5	302,2
13	W 12790 – Probe 5	E	214,8	272,7	285,9	304,6

4.1.1 Vergleich der externen mit den maschineninternen Sensoren

Bei den Prüfungen wurden neben den Signalen von Kraft und externem Messsystem auch die Messwerte der maschineninternen Wegsensoren mit aufgenommen. Zum Vergleich wurde auch mit den Messwerten aus den internen Sensoren ein Kraft-Verformungsdiagramm erstellt. Bei der Auswertung zeigte sich, dass die Ergebnisse zu niedrig waren, was mit einer minimalen Durchbiegung der beiden Querhäupter erklärt werden konnte. Allerdings wurde im Zuge dieser Auswertung eine frequenzabhängige Verschiebung der Signale des externen Messsystems zum maschineninternen Wegsignal gefunden (siehe Abb. 4.4).

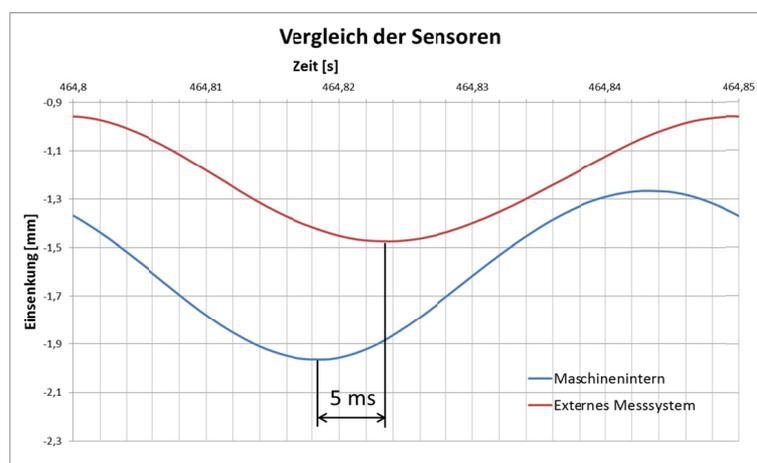


Abb. 4.4: Darstellung der Messverzögerung beim Vergleich externe / interne Sensoren.

Mit einem Oszilloskop wurde eine Phasenverschiebung von 5 ms ermittelt, was bei Aufnahme von 1000 Messwerten pro Sekunde eine Verschiebung von 5 Messwerten bedeutet. Ursache für diese Verschiebung war die Kabellänge der Wegaufnehmer sowie das Durchschleifen der Signale durch Messverstärker und Messumwandler. Da dies jedoch nicht geändert werden konnte, wurde die ermittelte Messverzögerung berücksichtigt und die Kurven erneut ausgewertet.

In Abb. 4.5 sind noch einmal die Kraft-Verformungskurven zur Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit bei der ZW 700 – Probe 1 dargestellt. Allerdings wurde hier die Messverzögerung von 5 ms bereits berücksichtigt. Beim Vergleich der Steigungen der Kurven ist zu erkennen, dass mit steigender Prüffrequenz auch die Steigung der Kurven zunimmt, was sich auch in den ermittelten Werten für k_{LFP} widerspiegelt. Vergleicht man diese Kurven weiters mit jenen aus Abb. 4.3 fällt auf, dass die Kurvenform durch die Berücksichtigung der Messverzögerung stark verbessert und somit aussagekräftige Kurven erstellt werden konnten.

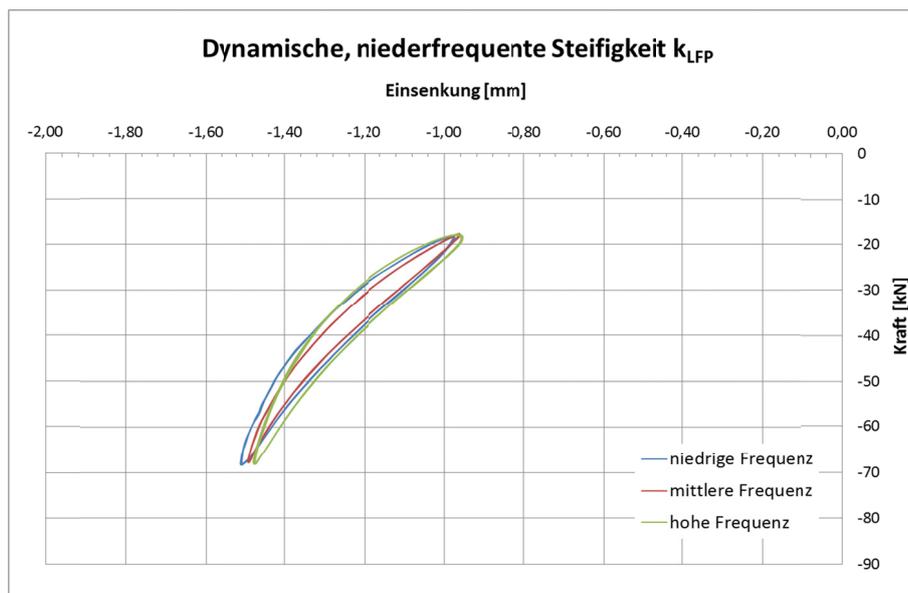


Abb. 4.5: Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700 nach Berücksichtigung der Messverzögerung.

4.2 Vergleichsmessungen an einer servo-hydraulischen Prüfmaschine

Wie bei den Messungen am Prüffeld wurden auch bei den Vergleichsmessungen an der servo-hydraulischen Prüfmaschine MTS 322 (MTS) die Bestimmung der statischen bzw. der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten durchgeführt. Auch hier wurden alle 4

Prüfungen in einem Versuch mit einer Pause von jeweils 1 min zwischen den Teilversuchen abgewickelt.

Der Prüfaufbau unterschied sich jedoch leicht von jenem am Prüffeld. Da hier kein Querhaupt als Gegenstück zur Verfügung stand, wurde ein stabiles Gegenstück angefertigt. Auch die Magnethalter zur Anbringung der LVDT's wurden an diesem Gegenstück befestigt (siehe Abb. 3.5, Seite 40). Die Krafteinleitung erfolgte aber mit demselben Stempel und der gleichen Druckplatte wie bei den Versuchen am Prüffeld.

In Abb. 4.6 ist beispielhaft die statische Kraft-Verformungskurve der ZW 700 – Probe 1 dargestellt. Man kann sehr gut erkennen, dass ein starkes Rauschen in den Messsignalen auftritt. Auf Grund dieses Rauschens, war es anfangs nicht möglich aussagekräftige Werte für k_{SP} zu generieren.

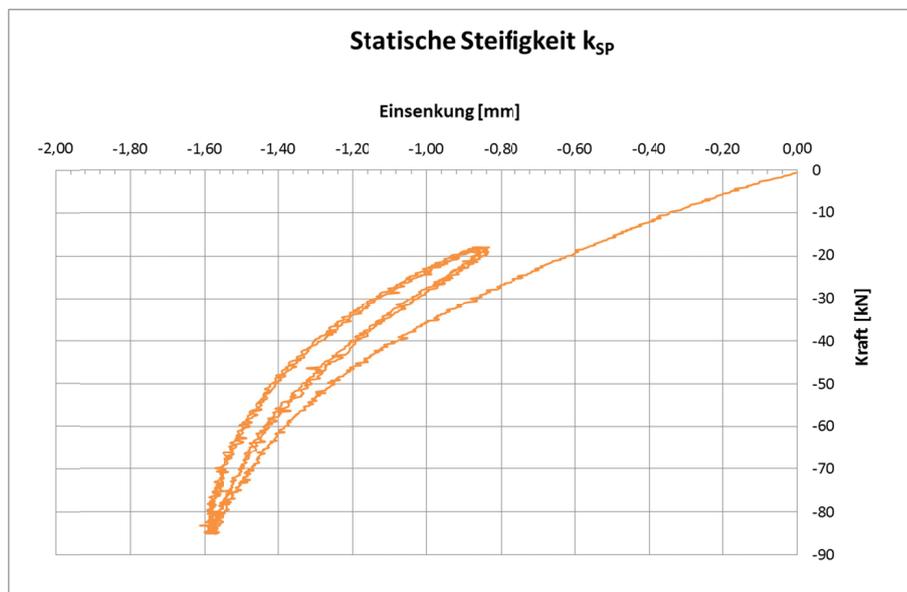


Abb. 4.6: Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der statischen Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322.

Auch die dynamischen, niederfrequenten Kraft-Verformungskurven wiesen dieses Rauschen auf, allerdings in etwas anderer Form. Auf Grund der höheren Frequenzen entstanden hier gleichmäßige Schwingungen entlang der Zyklen, was Rückschlüsse auf eine Störschwingung mit einer bestimmten Frequenz nach sich zog (siehe Abb. 4.7). Die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Messverzögerung trat auch hier auf und wurde bereits berücksichtigt.

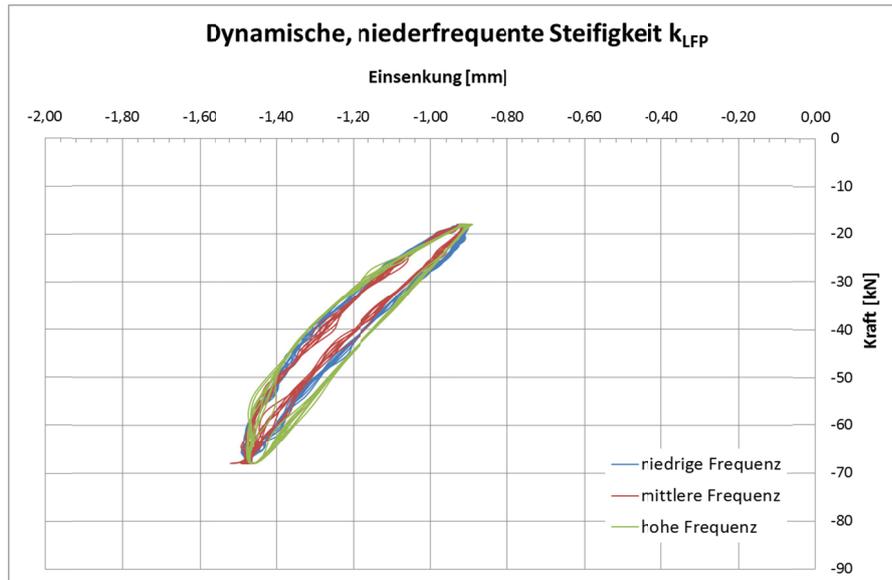


Abb. 4.7: Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322.

4.2.1 Reduktion des Signalrauschens an der MTS 322

Um das Signalrauschen zu reduzieren war der erste Schritt die Magnethalter vom Gegenstück auf die Maschinenholme zu heften. Da die Magnethalter die Schwingungen übertragen haben, wurden sie in weiterer Folge durch die in Kapitel 3.5.1 beschriebene LVDT-Halterung ersetzt. Dadurch konnte das Rauschen bereits reduziert werden.

Nach Rücksprache mit den Betreuern konnte nicht ausgeschlossen werden, dass das Rauschen über die Hydraulikleitungen übertragen wird. Daher wurden vor der Maschine hydraulische Pufferspeicher angebracht um mögliche Stöße abzufangen. Zum Abschluss wurden auch die aufgenommenen Messwerte angepasst, wobei die in der EN 13146 geforderten 20 Messwerte pro Zyklus nach wie vor gegeben sind. Insgesamt war also dieses Rauschen ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren, die im Laufe der Diplomarbeit weitestgehend behoben werden konnten.

Nach Minimierung dieser Faktoren wurden die Versuche an der MTS 322 wiederholt. Diese neuen Kraft-Verformungskurven der statischen bzw. dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten der ZW 700 – Probe 2 sind in Abb. 4.8 und Abb. 4.9 beispielhaft dargestellt. Die Kurvenform sowohl bei der statischen als auch bei der dynamischen, niederfrequenten Beanspruchung ähnelt sehr stark den am Bauteilprüffeld ermittelten Kraft-Verformungskurven.

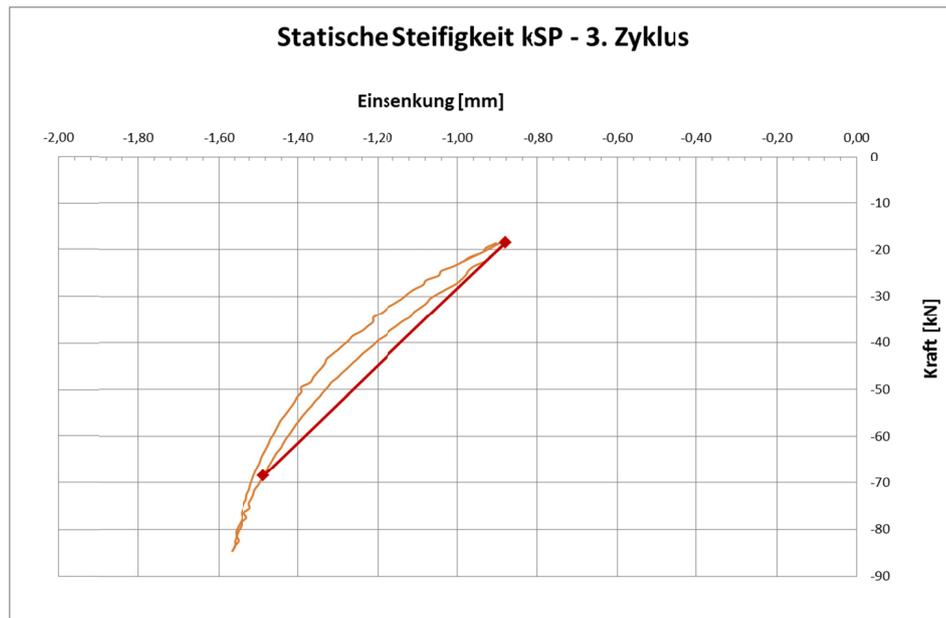


Abb. 4.8: Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der statischen Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322 nach Minimierung des Rauschens.

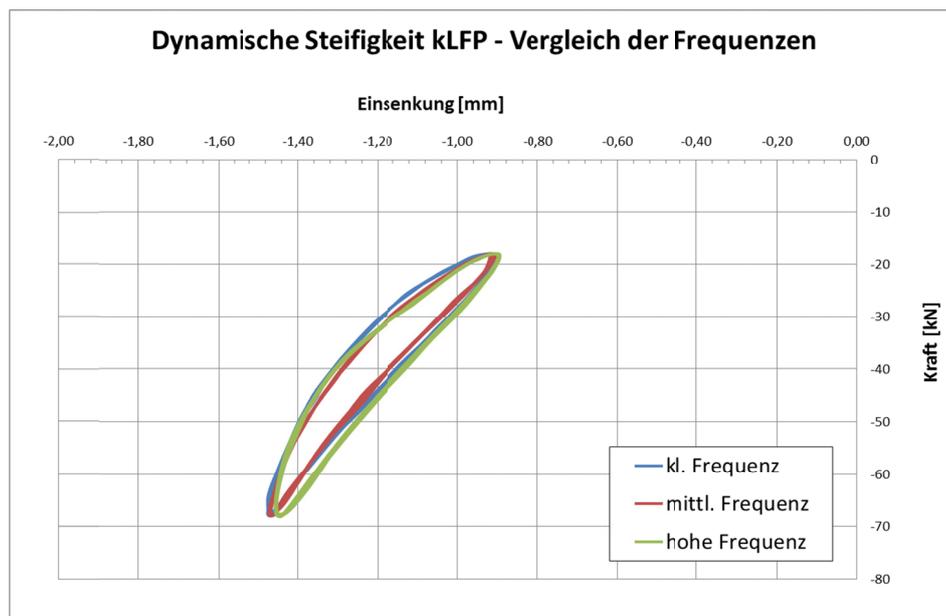


Abb. 4.9: Kraft-Verformungskurven bei Ermittlung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit der ZW 700 an der MTS 322 nach Minimierung des Rauschens.

Die Ergebnisse aus den Prüfungen der anderen Platten sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Für die Auswertung wurden nur ZW 700 – Probe 2, W 15126 – Probe 1, W 15127 – Probe 1 und W 12790 – Probe 1 herangezogen. Hier zeigte sich, dass die ermittelten Werte in der gleichen Größenordnung liegen wie die am Bauteilprüffeld ermittelten Werte.

Tabelle 4.3: Auflistung der Prüfplatten inklusive der zu prüfenden Kategorie an der MTS 322.

Nr.	Bezeichnung	Kat.	k _{SP} [kN/mm]	k _{LFP} [kN/mm] bei		
				5 Hz	10 Hz	20 Hz
2	ZW 700 – Probe 2	C	83,0	90,1	90,5	91,2
3	W 15126 – Probe 1	C	91,3	122,5	125,0	134,0
6	W 15127 – Probe 1	C	95,4	132,2	138,2	145,6
9	W 12790 – Probe 1	E	248,3	310,7	314,7	333,0

4.2.2 Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Messungen

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde eine Studie zur Gleichmäßigkeit der Messungen an beiden Maschinen durchgeführt. Hierfür wurden 8 Stück ZW 900 Schienenzwischenlagen von STP zur Verfügung gestellt.

Die Gleichmäßigkeit der Messungen wurde auf zwei verschiedene Arten überprüft. Zuerst wurden alle 8 Prüfplatten nach EN 13146 geprüft und die Ergebnisse miteinander verglichen. Dabei wurde eine Abweichung von ca. $\pm 4\%$ ermittelt (siehe Abb. 4.10).

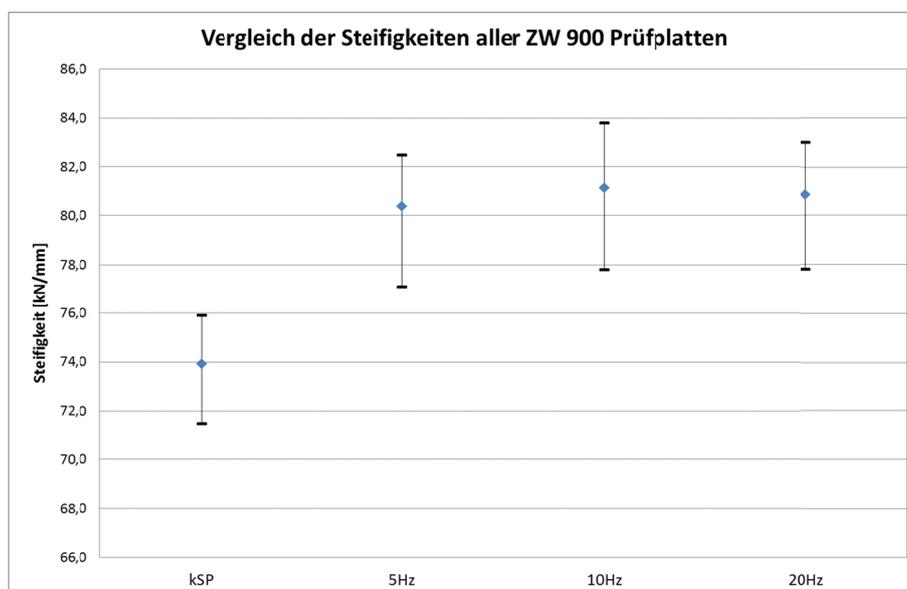


Abb. 4.10: Vergleich der Steifigkeiten aller acht ZW 900 Prüfplatten inklusive Abweichungen.

In weiterer Folge wurde die ZW 900 – Probe 1 dreimal mit einer Relaxationszeit von jeweils 1 h geprüft. Die Relaxationszeit musste eingehalten werden, um eine Prüfung bei annähernd gleichen Bedingungen nahe der Ausgangsdeformation zu gewährleisten. Die Abweichung der Messergebnisse wurde mit ca. $\pm 1,5\%$ ermittelt (siehe Abb. 4.11). Somit konnte gezeigt werden, dass die Versuche sehr gut reproduzierbar sind.

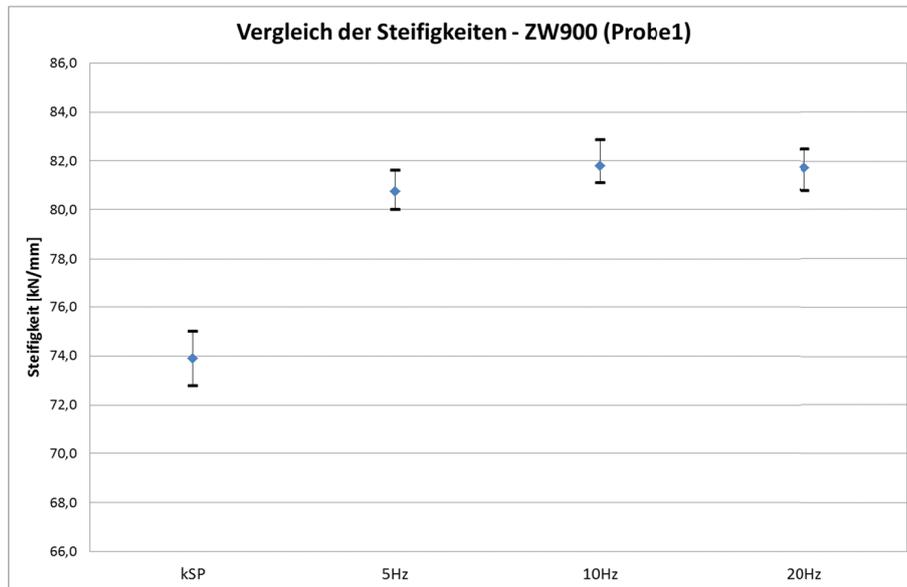


Abb. 4.11: Vergleich der Steifigkeiten der ZW 900 - Probe 1 inklusive Abweichungen.

4.3 Verifizierung der Ergebnisse

Um eine Verifizierung der Ergebnisse zu erreichen, erfolgte ein Vergleich mit Messwerten, die von Semperit zur Verfügung gestellt wurden. Die vergleichenden Messungen für die statische Steifigkeit wurden bei STP durchgeführt. Zur Verifizierung der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeit wurden Messwerte eines alternativen Prüfinstituts (API) herangezogen. Alle Versuche der beiden Prüfinstitutionen erfolgten bereits vorab an ausgewählten Zwischenlagen, um die Aussagekraft der Vergleichsmessungen möglichst zu maximieren.

In Abb. 4.12 ist ein Vergleich der ermittelten statischen Steifigkeiten der Prüfkörper ZW 700 (Probe 2), W 15126 (Probe 1), W 15127 (Probe 1) und W 12790 (Probe 1) in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Dieses Diagramm zeigt, dass die an der Montanuniversität Leoben (MUL) gemessenen statischen Steifigkeiten sehr gut mit jenen der STP übereinstimmen.

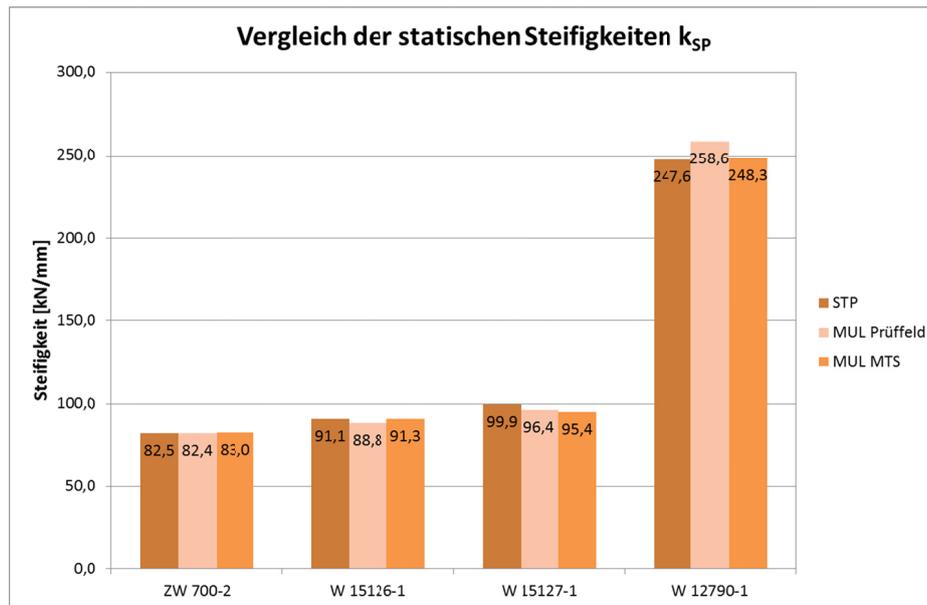


Abb. 4.12: Vergleich der statischen Steifigkeiten zwischen MUL und STP an ausgewählten Zwischenlagen.

Allerdings muss angemerkt werden, dass die Differenz der Einsenkungen zwischen minimaler und maximaler Belastung an den steifen Platten relativ gering ist. Ändert sich diese Differenz nur um 0,01 mm so bewirkt das bereits eine Änderung der Steifigkeit von rund 17 kN/mm. Berücksichtigt man diese empfindliche Reaktion beim Vergleich der Ergebnisse, so relativiert sich der Unterschied zwischen MUL und STP bei der W 12790 – Probe 1.

In Abb. 4.13 ist ein Vergleich der ermittelten dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten an der ZW 700 – Probe 1 in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Die Darstellung umfasst den Vergleich bei den beiden Prüffrequenzen 5 Hz und 10 Hz. Höhere Frequenzen konnten nicht verglichen werden, da die Prüfungen des API abweichend von der Norm bei 30 Hz durchgeführt wurden.

Im Vergleich mit dem alternativen Prüfinstitut ist eine Tendenz zu niedrigeren Messwerten gegeben, was durch die unterschiedlichen Genauigkeiten der jeweiligen Messsysteme erklärt werden kann. Allerdings ist auch hier eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte zwischen Prüffeld und MTS 322 der MUL erkennbar.

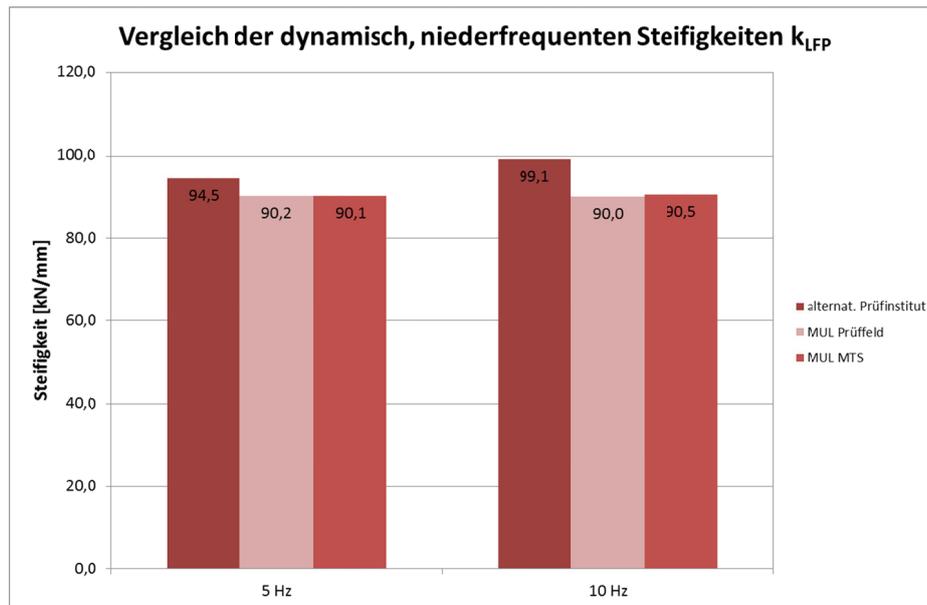


Abb. 4.13: Vergleich der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten zwischen MUL und API an ZW 700 – Probe 2.

4.4 Erster Versuchablauf nach EN 13146

Dieser Versuch wurde vor der Entwicklung des am Prüffeld montierten Querträger durchgeführt. In Abstimmung mit STP wurde der Versuchablauf nach EN 13146 etwas abgeändert. Da im Rahmen dieser Masterarbeit die Eigenschaften der Spannklemme nicht zu überprüfen war, wurde die Ermittlung der Spannkraft aus dem Ablauf genommen.

4.4.1 Durchschubwiderstand vor Dauerversuch

Zur Durchführung der folgenden Versuche wurde die ZW 700 – Probe 1 verwendet. Diese wurde zwischen Betonschwelle und Schiene platziert und die Schrauben für die Befestigung der Spannklemme mit einem Anzugsmoment von etwa 300 Nm verspannt. Da das Anzugsmoment von mehreren Faktoren abhängig ist, wurde darauf geachtet, dass der mittlere Teil der Spannklemme die Schiene gerade nicht berührt um eine Abhängigkeit der Messwerte vom Anzugsmoment zu eliminieren. Diese Verspannung wurde, wie in der Norm gefordert, während der weiteren Versuche nicht gelöst.

Für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes vor dem Dauerversuch wurde der Aufbau nach Abb. 3.17 (siehe Seite 51) realisiert und das externe Messsystem in Form von vier LVDT's angebracht. Die Auswertung erfolgte über die Differenz zwischen den in Abb. 4.14 beschriebenen LVDT's 1 und 2 sowie dem LVDT 3. An der Rückseite der Schwelle wurde zusätzlich ein LVDT angebracht, der die Aufgabe hatte eine mögliche

Verdrehung der Schwelle aufzuzeichnen. Auf Grund der neuen Halterungen aus Hartholz konnte diese Verdrehung der Schwelle soweit reduziert werden, dass die von LVDT 4 aufgezeichneten Werte für die weiteren Auswertungen unberücksichtigt bleiben konnten.

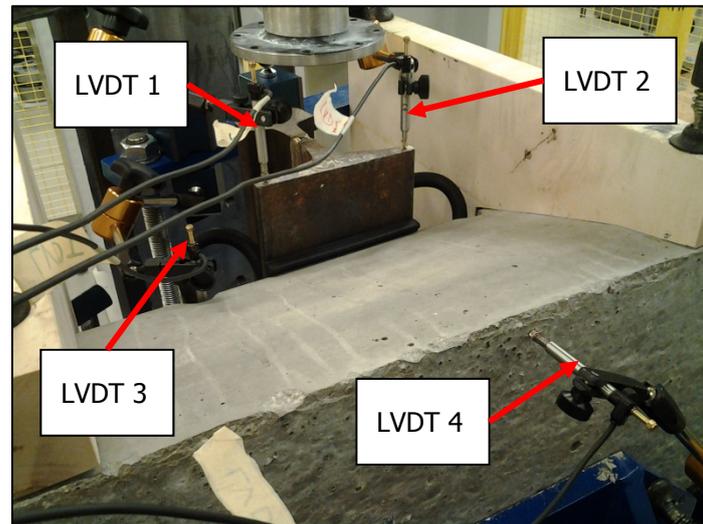


Abb. 4.14: Anordnung der LVDT's für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes.

Gemäß EN13146-1 war eine Kraft in Längsrichtung der Schiene so lange aufzubringen, bis die Schiene durchrutscht oder bis das 4-fache der geforderten Kraft – in diesem Fall das 4-fache von 7 kN – erreicht ist. Da das manuelle Stoppen der Krafteinleitung auch die Aufzeichnung der Messwerte stoppen würde und das Durchrutschen der Schiene nicht direkt gemessen werden konnte, wurde die Schiene bei einer maximalen Stemperverschiebung von 6 mm automatisch entlastet, da hier die Schiene auf jeden Fall durch das Befestigungssystem gerutscht war. Die Aufbringung der Kraft erfolgte insgesamt viermal, wobei der erste Versuch wie in EN 13146-1 gefordert verworfen wurde (siehe Tabelle 4.4). Der arithmetische Mittelwert aus den 3 Zyklen wurde gebildet und ein Durchschubwiderstand $F = 17,8$ kN ermittelt, was größer als der geforderte Wert von 7 kN war.

Tabelle 4.4: Ermittelte Werte aus Durchschubwiderstand vor dem Dauerschwingversuch.

Nr.	Max. Längskraft F [kN]	Mittelwert F [kN]
2	17,5	17,8
3	17,9	
4	17,8	

Die gemessenen Daten wurden in einem Kraft-Verformungsdiagramm dargestellt (siehe Abb. 4.15) um eine bessere Visualisierung der Ergebnisse zu gewährleisten.

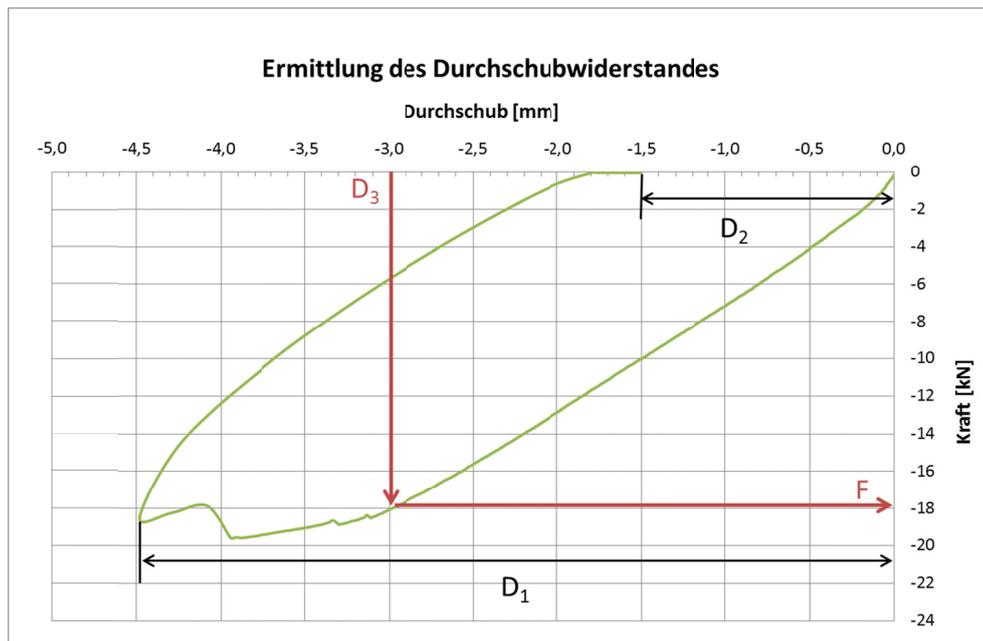


Abb. 4.15: Ermittlung des Durchschubwiderstandes am 3. Zyklus.

Vergleicht man die Zyklen bei der Ermittlung des Durchschubwiderstandes miteinander, so kann eine gute Gleichmäßigkeit der Messungen gezeigt werden (siehe Abb. 4.16). Diese Gleichmäßigkeit ist ein weiteres Indiz für einen funktionierenden Versuch und damit verbundene aussagekräftige Werte.

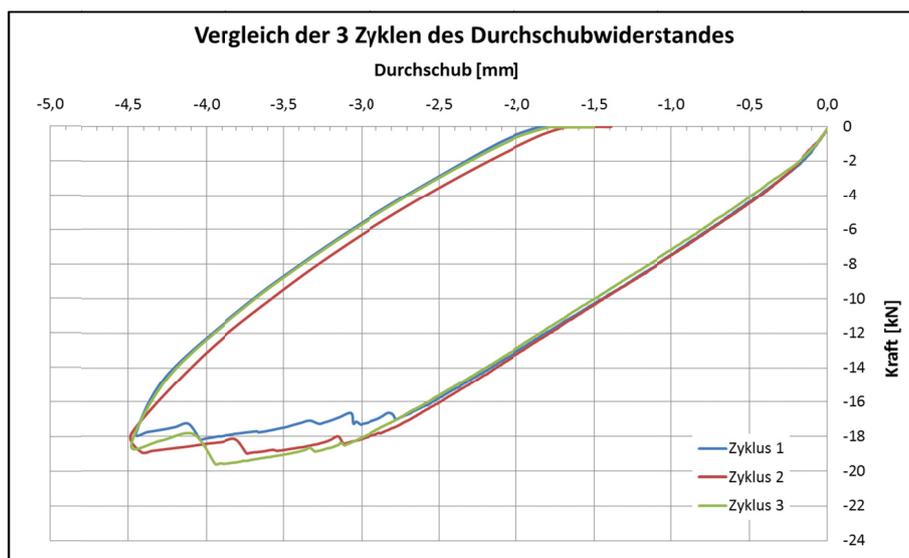


Abb. 4.16: Vergleich der 3 Zyklen bei Ermittlung des Durchschubwiderstandes.

4.4.2 Statische Steifigkeit des Befestigungssystems vor Dauerversuch

Für die Ermittlung der statischen Steifigkeit musste der Prüfaufbau geändert werden. Die Halbschwelle wurde umgelegt und nach Unterlegen einer Sperrholzplatte mit den dafür vorgesehenen Halterungen fixiert. An der Rückseite wurde ein Distanzstück eingelegt um die Vorneigung der Schienenauflagefläche an der Halbschwelle zu minimieren. Zur Messung der Einsenkungen wurden 4 LVDT's am Schienenfuß montiert.

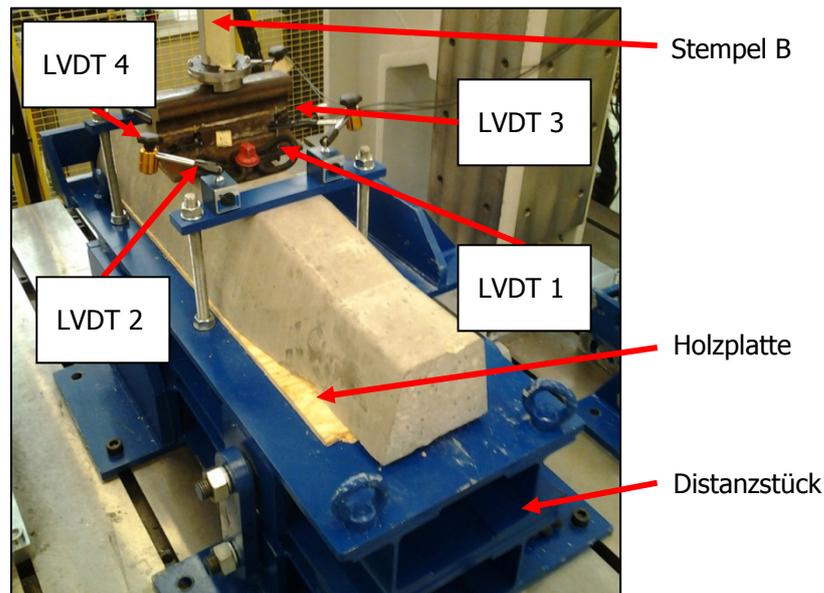


Abb. 4.17: Prüfaufbau für Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems.

Nun konnte die Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems, wie in Kapitel 2.6.3 beschrieben, durchgeführt werden. Die zur Ermittlung der erforderlichen Belastungen notwendige Kategorie C wurde von Semperit Technische Produkte GmbH vorgegeben. Dadurch wurde eine Minimalkraft $F_{\min} = 18 \text{ kN}$ sowie eine Maximalkraft $F_{\max} = 64 \text{ kN}$ ermittelt.

In Abb. 4.18 sind die Kraft-Verformungskurve aller 4 LVDT's dargestellt. Vergleicht man LVDT 1 und 2 bzw. 3 und 4, so zeigt sich eine gleichmäßige Einsenkung auf jeder Seite der Schiene. Vergleicht man jedoch die Einsenkungen der Schienenseiten, so ist eine starke Differenz dieser zu erkennen. Dies und die Tatsache, dass die LVDT's 3 und 4 am Beginn der Messung sogar abgehoben wurden, macht deutlich, dass das Distanzstück zu niedrig war. Da die Auswertung allerdings erst nach dem Dauerversuch durchgeführt wurde, konnte keine Änderung des Distanzstückes durchgeführt werden.

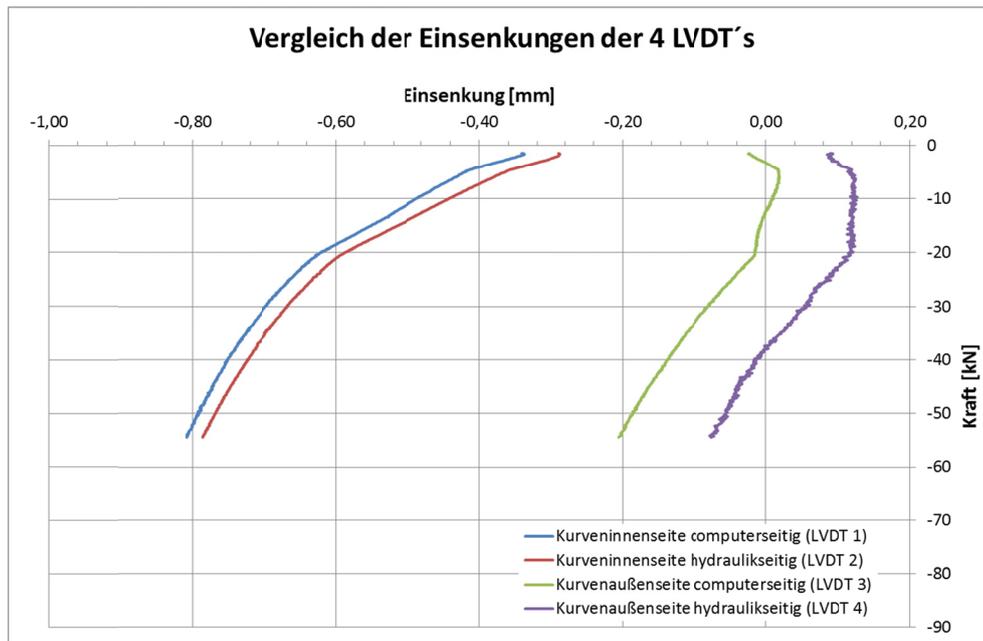


Abb. 4.18: Vergleich der Einsenkungen der 4 LVDT's bei der Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems.

Um trotzdem einen Vergleich der Steifigkeiten vor und nach dem Dauerversuch erstellen zu können, erfolgte die Auswertung bei der 3. Belastung zwischen F_{\min} und F_{SA2} , was 80 % der Maximalkraft F_{\max} entspricht, als Mittelwert der Einsenkungen der LVDT's 1 und 2. Daraus wurde eine statische Steifigkeit $k_{SA} = 109,9 \text{ kN/mm}$ ermittelt.

4.4.3 Dauerschwingversuch

Nach Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems wurde der Prüfstand auf die geforderten 33° schräggestellt und der Querträger inklusive Halterungen montiert. Zusätzlich wurden die Abstützungen zum Prüffeld hin eingebaut und verspannt. Neben den sechs in der Norm geforderten wurden zwei weitere LVDT's angebracht um den Versatz des Schienenfußes zu messen. Die Anbringung der Wegaufnehmer ist in Abb. 4.19 dargestellt, wobei LVDT 1 bis 4 die Einsenkungen am Schienenfuß, LVDT 5 und 6 die Neigung des Kopfes und LVDT 7 und 8 den Versatz der Schiene aufzeichnen.

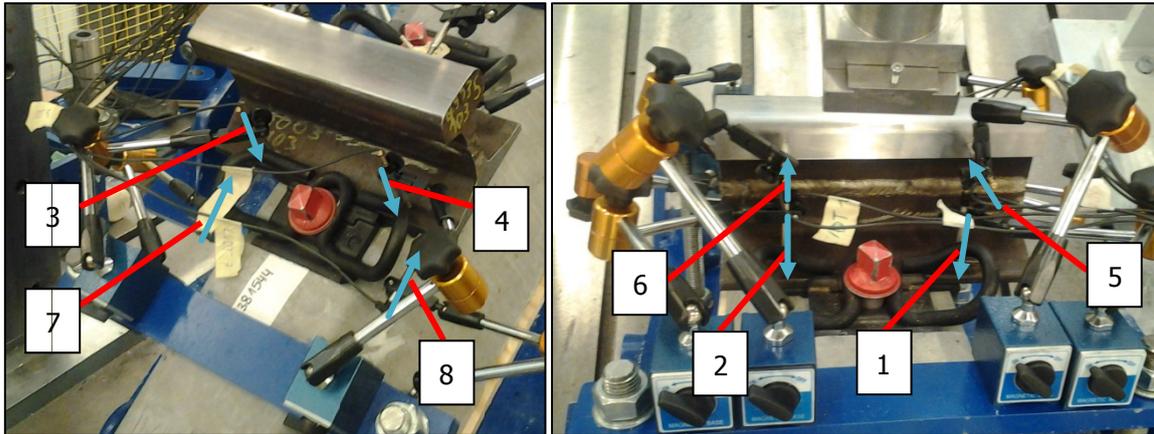


Abb. 4.19: Anordnung der für den Dauerschwingversuch erforderlichen 8 LVDT's.

Zu Beginn der Messung erfolgte eine sogenannte statische Voreichung. Dabei wurde die Schiene in der schräggestellten Prüfanordnung einmal vertikal mit 95 kN belastet. Nach der statischen Voreichung wurde der Dauerschwingversuch, wie in Kapitel 2.6.6 beschrieben, durchgeführt. Am Ende der dynamischen Belastung erfolgte eine statische Nacheichung bis zur Maximalkraft. In Abb. 4.20 sind die Einsenkungen der 4 LVDT's am Schienenfuß inklusive statischer Vor- und Nacheichung dargestellt. Schon nach etwa 300.000 Zyklen stellt sich ein Plateau bei den Einsenkungen ein, das sich bis zum Ende der Prüfung kaum verändert. LVDT 1 zeichnete auf Grund eines technischen Gebrechens keine Messwerte auf. Die anderen Kurven zeigen wie erwartet eine Differenz zwischen LVDT 2 bzw. LVDT 3 und 4, was durch die Schrägstellung erklärt werden kann.

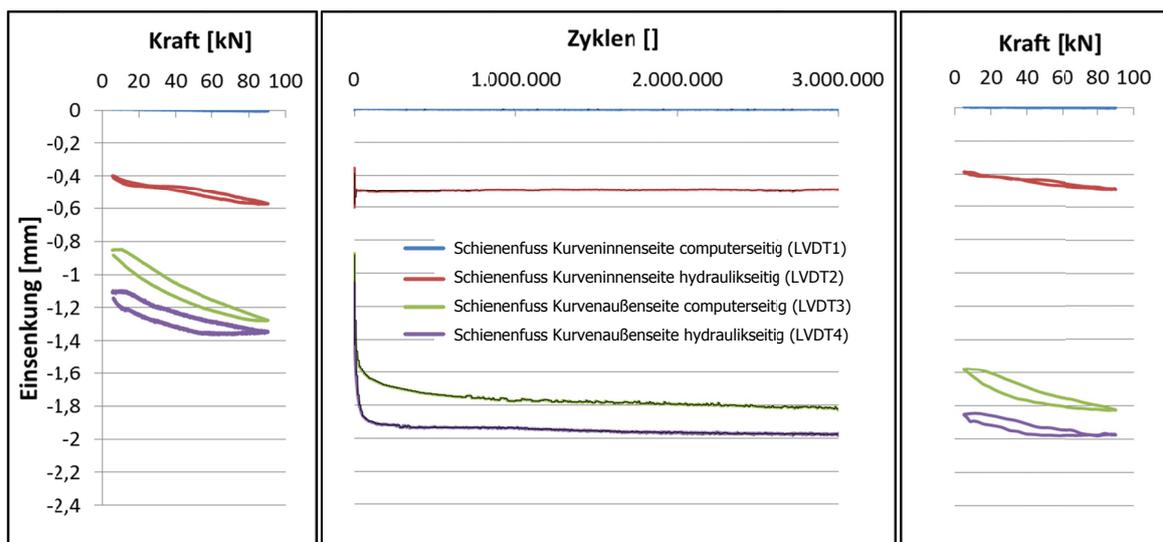


Abb. 4.20: Darstellung der Signale von LVDT 1 bis 4 inklusive Vor- und Nacheichung.

In Abb. 4.21 ist einerseits die Neigung des Schienenkopfes (LVDT 5 und 6), andererseits der Versatz des Schienenfußes (LVDT 7 und 8) dargestellt. Wie schon in Abb. 4.20 sind auch hier die Werte der statischen Eichung nach dem Dauerversuch höher als davor, was mit dem Verschleiß und der Ermüdung der Prüfplatten erklärt werden kann. LVDT 7 zeigt im Laufe der Messung einige Spitzenwerte, die durch ein Verrutschen der LVDT-Spitze entstanden sind. Die Kurven von LVDT 5 und 6 weisen nur auf Grund der Anordnung am Prüfstand positive Werte auf.

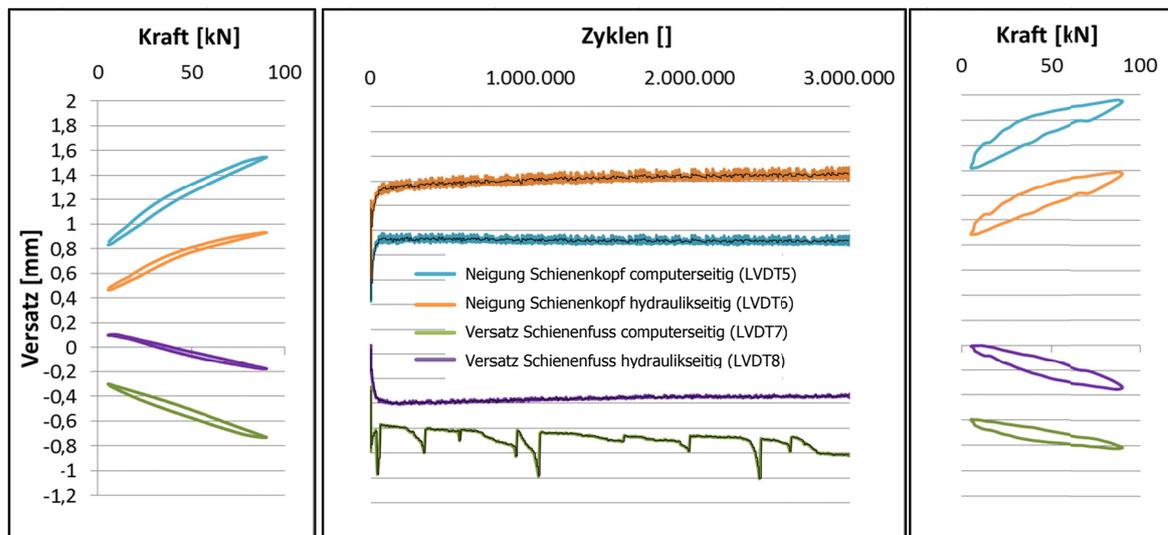


Abb. 4.21: Darstellung der Signale von LVDT 5 bis 8 inklusive Vor- und Nacheichung.

Den oben angesprochenen Verschleiß der SZL erkennt man deutlich in Abb. 4.22. In den beiden rot markierten Bereichen sind durch die dynamische Belastung Risse an der seitlichen Lasche entstanden.



Abb. 4.22: Prüfplatte ZW 700 - Probe 1 nach dem Dauerschwingversuch.

4.4.4 Einflüsse des Dauerschwingversuches auf die statische Steifigkeit am Befestigungssystem

Im Anschluss an den Dauerschwingversuch wurde eine erneute Messung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems gemacht. In Abb. 4.23 ist wieder der Vergleich der Einsenkungen aller 4 LVDT's dargestellt und auch hier lieferte LVDT 1 keine Messwerte. Auch die Differenz der Einsenkungen an den Schienenseiten als Folge des zu niedrigen Distanzstückes tritt wieder auf.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde nun mittels LVDT 2 die statische Steifigkeit des Befestigungssystems $k_{SA} = 170,9 \text{ kN/mm}$ berechnet, was deutlich über dem vor dem Dauerversuch ermittelten Wert liegt. Dies entspricht einer Versteifung des Systems von ca. 55 % und ist somit höher als die zulässige Versteifung laut Norm.

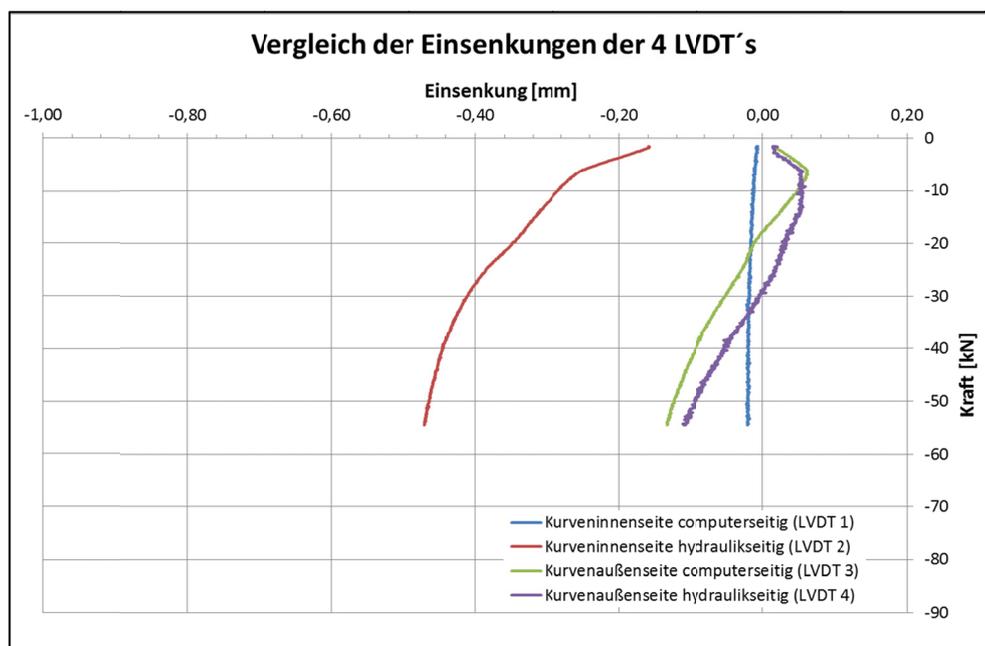


Abb. 4.23: Vergleich der Einsenkungen der 4 LVDT's bei der Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems nach dem Dauerschwingversuch.

Auf Grund des zu niedrigen Distanzstückes, des Ausfalls von LVDT 1 und der damit einhergehenden zu großen Differenz der Steifigkeiten vor und nach dem Dauerschwingversuch muss davon ausgegangen werden, dass die Versuchsergebnisse in dieser Form keinerlei Relevanz aufweisen. Nach Behebung der technischen Probleme sowie der Änderung des Distanzstückes wird der Versuch wiederholt, um aussagekräftige Werte zu erhalten.

4.4.5 Einflüsse des Dauerschwingversuches auf den Durchschubwiderstand

Auch der Durchschubwiderstand wurde im Anschluss an die Ermittlung der statischen Steifigkeit neuerlich überprüft. Aufbau und Belastungen wurden auch hier gleich gehalten wie vor dem Dauerschwingversuch. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Ermittelte Werte aus Durchschubwiderstand nach Dauerschwingversuch.

Nr.	Max. Längskraft F [kN]	Mittelwert F [kN]
2	18,1	16,3
3	15,6	
4	15,4	

Nach Ermittlung der Einzelwerte aller 3 Zyklen wurde ein Mittelwert von $F = 16,3$ kN errechnet. Dieser, im Vergleich zum Durchschubwiderstand vor dem Dauerschwingversuch, leicht verminderte Wert kann auf den Verschleiß der Prüfplatte zurückgeführt werden. Allerdings ist die Differenz $\leq 25\%$, wodurch bestätigt wurde, dass die ZW 700 – Probe 1 die Anforderungen an den Durchschubwiderstand erfüllt.

4.4.6 Verifizierung der Ergebnisse mit Prüfergebnissen eines alternativen Prüfinstituts

Zum Abschluss des Versuches wurde eine Verifizierung der Ergebnisse durchgeführt. Hierfür wurden die Ergebnisse aus den Kapiteln 4.4.1 bis 4.4.5 mit, im Vorfeld, von einem alternativen Prüfinstitut (API) ermittelten Werten für diesen Prüfaufbau bzw. diese Belastungen verglichen.

Auf die Verifizierung der Werte aus der Bestimmung der statischen Steifigkeiten des Befestigungssystems wurde hier verzichtet, da ein Vergleich der ermittelten Werte für k_{SA} mit jenen des API nicht relevant wäre.

Bezüglich der Durchschubwiderstände wurde festgestellt, dass die an der MUL ermittelten Werte sehr gut mit jenen des alternativen Prüfinstituts vergleichbar sind. Daher ist der Prüfaufbau für die Ermittlung des Durchschubwiderstandes prinzipiell geeignet um aussagekräftige Messwerte zu erzielen. Ein Vergleich der Werte vor und nach dem Dauerschwingversuch sowie mit dem API ist in Abb. 4.24 dargestellt.

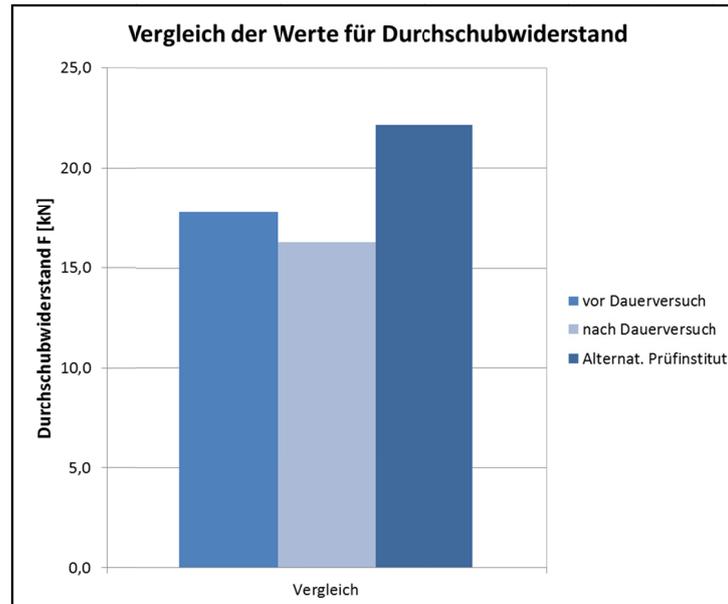


Abb. 4.24: Vergleich der Durchschubwiderstände.

Vergleicht man die Ergebnisse aus dem Dauerschwingversuch mit jenen des API so ist sowohl bei den Einsenkungen als auch bei der Schienenneigung und dem Versatz des Schienenfußes eine Differenz festzustellen. Beispielsweise steigt die Schienenneigung zwischen maximaler und minimaler Belastung am API mit zunehmender Zykluszahl bis zum Ende des Versuches auf ca. 7 mm an, während sich der vergleichbare Wegaufnehmer in Leoben nach ungefähr 300.000 Zyklen bei etwa 2 mm einpendelt. Ähnlich verhalten sich auch die Messwerte der anderen LVDT's.

Der Grund für diese zu geringe Auslenkung der Schiene liegt, wie bereits in Kapitel 3.5.4.2 (Seite 53) beschrieben, in der Einleitung der Kraft. Dadurch ist die Schiene und in weiterer Folge die Schienenzwischenlage nur mit einem Teil der geforderten Kraft belastet. Ausgehend von diesen Vergleichen war eine Änderung an der Krafteinleitung zwingend erforderlich.

4.5 Zweiter Versuch nach EN 13146

Dieser Versuch wurde mit dem am Prüffeldrahmen montierten Querträger durchgeführt. In Abstimmung mit Semperit Technische Produkte GmbH wurde auch hier der Versuchsablauf nach EN 13146 an einer zusätzlichen SZL etwas abgeändert und, wie schon beim ersten Versuch, die Ermittlung der Spannkraft aus dem Ablauf genommen. Auch auf die Ermittlung des Durchschubwiderstandes wurde auf Grund der Anforderungen von Semperit Technische Produkte GmbH verzichtet.

4.5.1 Statische Steifigkeit des Befestigungssystems vor Dauerversuch

Für die Ermittlung der statischen Steifigkeit wurde die SZL zwischen Betonschwelle und Schiene platziert und die Schrauben für die Befestigung der Spannklemme wieder soweit verspannt, dass der mittlere Teil der Spannklemme die Schiene gerade nicht berührte um eine Abhängigkeit der Messwerte vom Anzugsmoment zu eliminieren. Diese Verspannung wurde während der weiteren Versuche nicht gelöst.

Sowohl der Aufbau als auch die erforderlichen Kräfte waren mit denen des ersten Versuches (siehe Kapitel 4.4.2, Seite 71) identisch. Es wurde allerdings ein neues, etwas höheres, Distanzstück zur Minimierung der Vorneigung der Schienenauflagefläche an der Halbschwelle eingelegt.

Abb. 4.25 zeigt die Kraft-Verformungskurve eines einzelnen LVDT über den gesamten Belastungsverlauf. Bei dieser Darstellung ist eine höhere Einsenkung der Schiene beim 2. und 3. Zyklus gut zu erkennen. Erklärbar ist diese Erhöhung durch den bereits beschriebenen Mullins-Effekt. Dies beweist, dass die Durchführung der beiden Einschwingzyklen vor der eigentlichen Messung notwendig ist, um aussagekräftige und vergleichbare Werte zu erhalten.

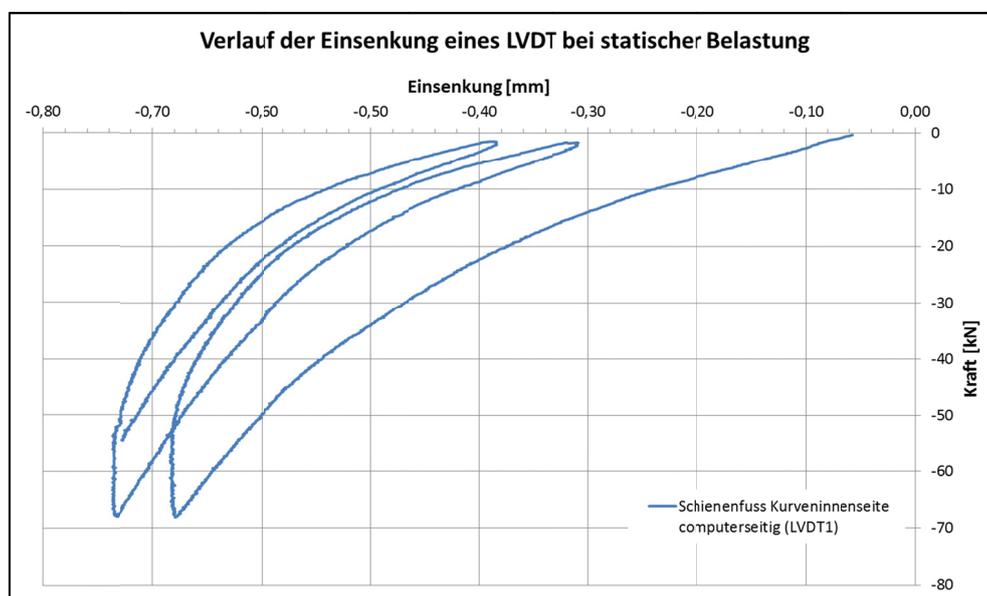


Abb. 4.25: Kraft-Verformungskurve eines LVDT über den gesamten Belastungsverlauf.

In Abb. 4.26 sind die Kraft-Verformungskurven aller 4 LVDT's bei der 3. Belastung dargestellt. Vergleicht man LVDT 1 und 3 bzw. 2 und 4, so zeigt sich eine gleichmäßige Einsenkung auf jeder Seite der Schiene. Beim Vergleich der Einsenkungen entlang der

Schiene Länge, ist eine Differenz dieser zu erkennen, was zeigt, dass entweder die Schiene und/oder die LVDT's nicht optimal platziert waren.

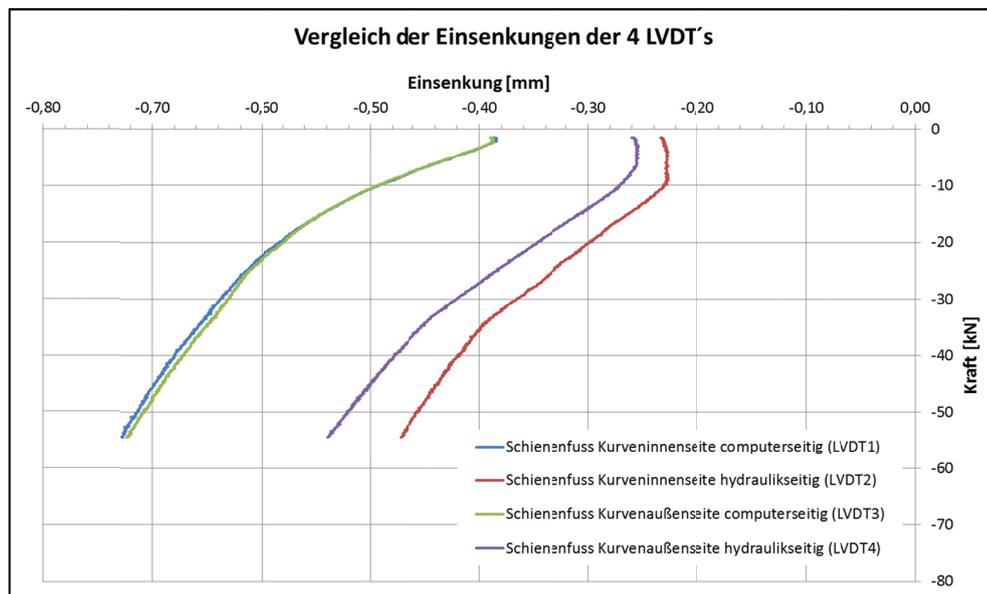


Abb. 4.26: Vergleich der Einsenkungen der 4 LVDT's bei der Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems.

Eine Änderung der Platzierung konnte nicht durchgeführt werden, da die Auswertung erst nach dem Dauerversuch durchgeführt wurde. Aus diesen Kurven wurde eine statische Steifigkeit $k_{SA} = 157,4 \text{ kN/mm}$ zwischen F_{\min} und F_{SA2} , was 80 % der Maximalkraft F_{\max} entspricht, als Mittelwert der Einsenkungen der LVDT's 1 und 3 berechnet.

4.5.2 Dauerschwingversuch

Nach Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems wurde der Querträger am Prüffeldrahmen montiert, der Prüfstand schräggestellt und die zusätzlichen, gedrehten Abstützungen eingestellt und verspannt. Der übrige Aufbau sowie die Anordnung der 8 LVDT's entsprach wieder genau dem aus Versuch 1 (siehe 4.4.3, Seite 72).

Zu Beginn der Messung erfolgte eine statische Voreichung. Danach wurde der Dauerschwingversuch, wie in Kapitel 2.6.6 beschrieben, mit einer maximalen Belastung von 90 kN gestartet. Allerdings musste der Versuch bereits nach etwa 1,3 Mio. Zyklen wegen technischer Probleme abgebrochen werden. Wie in Abb. 4.27 ersichtlich, hatte sich der Lagerungsbolzen der Krafteinleitung gelöst und war nahezu vollständig aus der Gleitführung gerutscht. Dies hatte zur Folge, dass die Kraft nicht mehr ordnungsgemäß in die Schiene geleitet wurde und auch einige LVDT's verrutschten.

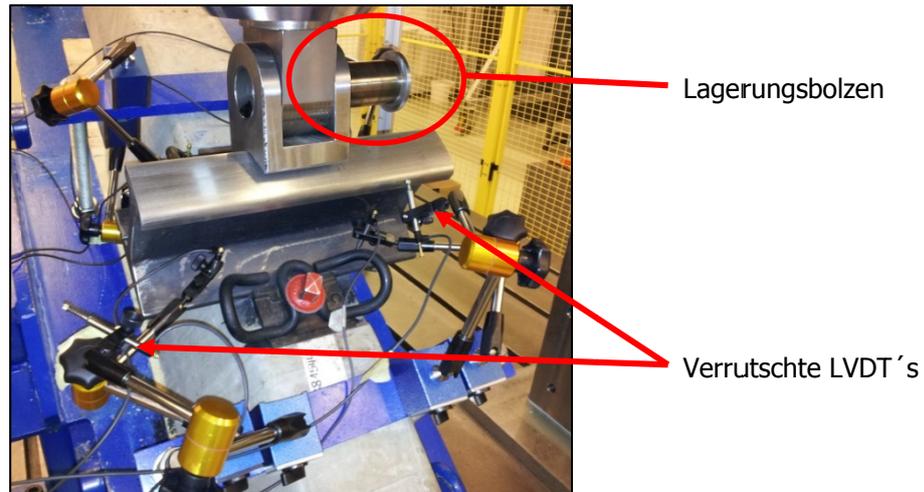


Abb. 4.27: Detailaufnahme des Prüfaufbaus bei Versuchsabbruch nach rund 1,3 Mio. Zyklen.

Da das Verrutschen der LVDT's bereits nach ca. 1 Mio. Zyklen eintrat, wurde die Auswertung bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführt. In Abb. 4.20 sind die Einsenkungen der 4 LVDT's am Schienenfuß inklusive statischer Voreichung dargestellt. Schon nach etwa 300.000 Zyklen stellt sich annähernd ein Plateau bei den Einsenkungen ein, das sich über 24 Stunden kaum verändert. Bei ca. 800.000 Zyklen steigen die Einsenkungen an, was auf eine beginnende Schädigung der Schienenzwischenlage deutet.

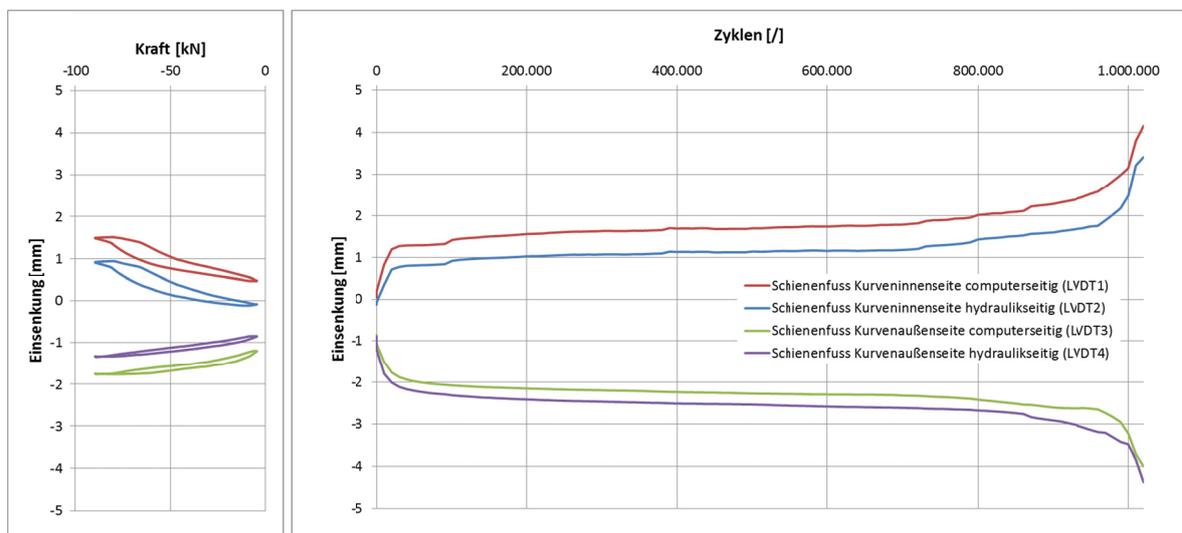


Abb. 4.28: Darstellung der Signale von LVDT 1 bis 4 inklusive statischer Vor- und Nacheichung.

In Abb. 4.29 ist die Neigung des Schienenkopfes (LVDT 5 und 6), der Versatz des Schienenfußes (LVDT 7 und 8), wie auch die jeweiligen Werte der statischen Voreichung dargestellt. Auch hier sind die Ausbildung eines Plateaus und auch der Anstieg der Neigung bei rund 800.000 Zyklen erkennbar, was ebenfalls ein Indiz für die Schädigung der Schienenzwischenlage ist.

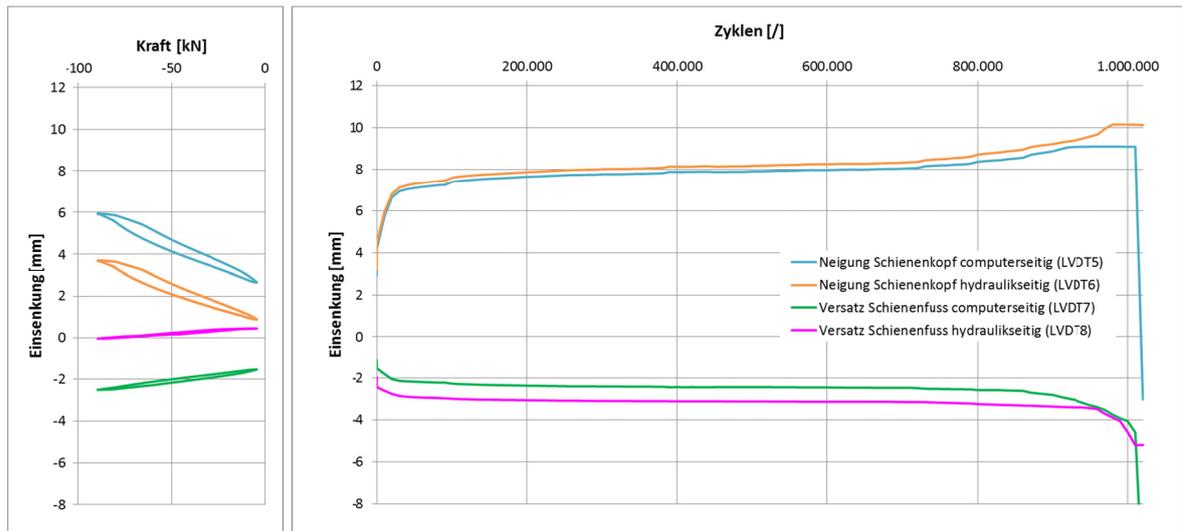


Abb. 4.29: Darstellung der Signale von LVDT 5 bis 8 inklusive statischer Vor- und Nacheichung.

Wie zu erwarten war, bleibt der Versatz des Schienenfußes ab etwa 100.000 Zyklen annähernd gleich, beginnt jedoch bei rund 800.000 Zyklen zu steigen. Dieser Anstieg lässt sich damit erklären, dass die fehlerhafte Krafteinleitung nach Durchrutschen des Lagerungsbolzens, neben dem bereits beschriebenen Verrutschen der LVDT's, auch eine Schädigung der Winkelführungsplatte nach sich zog (siehe Abb. 4.30).



Abb. 4.30: Schädigung der Winkelführungsplatte durch fehlerhafte Krafteinleitung.

Betrachtet man die Kraft-Verformungskurven der Einsenkungen am Schienenfuß in Abhängigkeit von der Zykluszahl, so kann gezeigt werden, dass sich sowohl Sekantenmodul, als auch dynamischer Modul verändern. Während die Veränderung des dynamischen Moduls (siehe Abb. 4.31) auf die Schädigung bzw. den Verschleiß der SZL zurückzuführen ist, gibt die Veränderung des Sekantenmoduls (siehe Abb. 4.32) Aufschluss über die Schädigung der SZL und zusätzlich über Kriechvorgänge im Material.

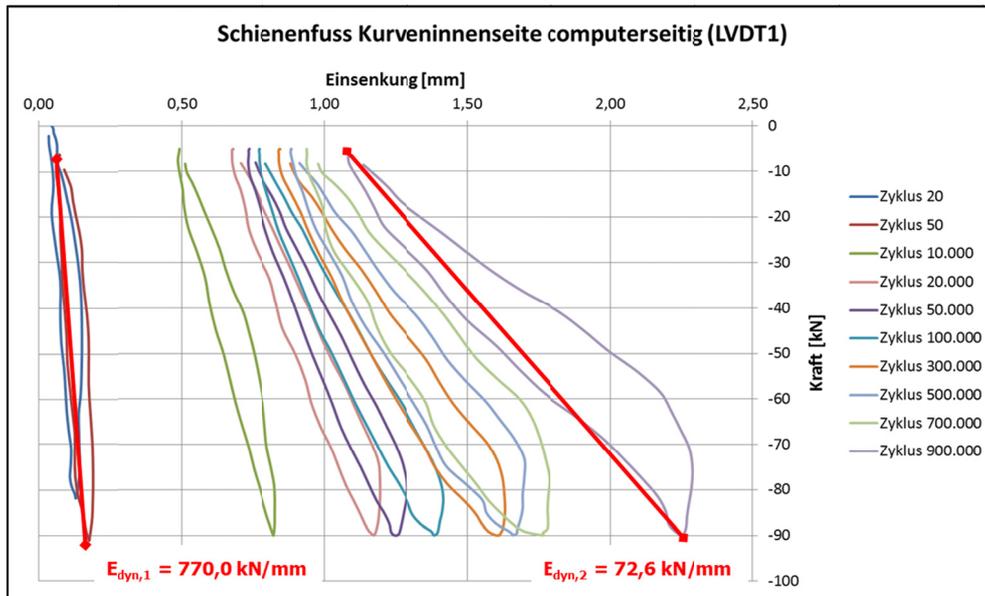


Abb. 4.31: Veränderung des dynamischen Moduls am Beispiel von LVDT 1.

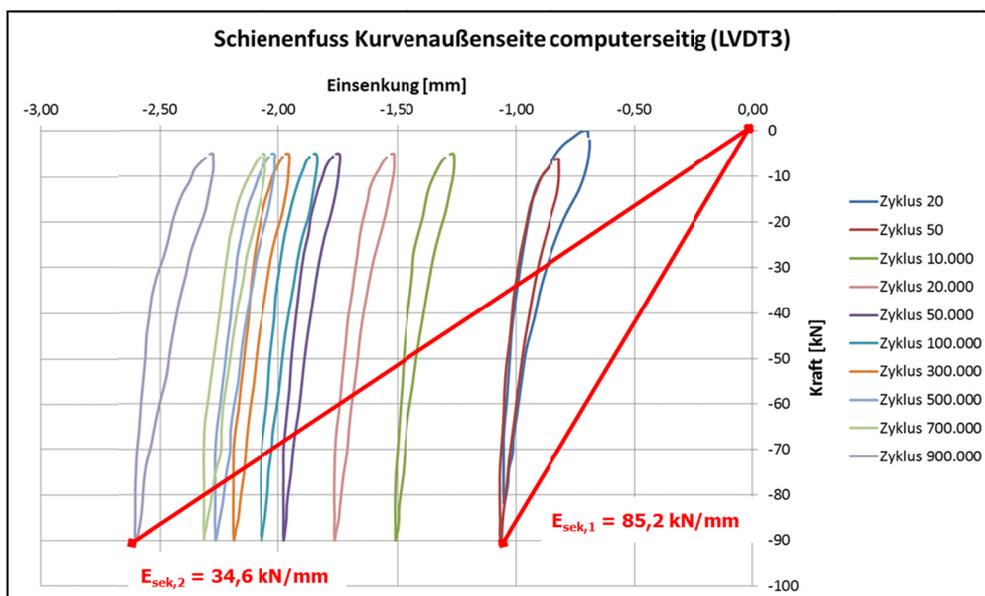


Abb. 4.32: Veränderung des Sekantenmoduls am Beispiel von LVDT 3.

Zum besseren Verständnis wurde sowohl der dynamische Modul als auch der Sekantenmodul über die Zykluszahl aufgetragen (siehe Abb. 4.33). Die Kurve des dynamischen Moduls zeigt bei rund 800.000 Zyklen einen Knick nach unten, was mit den Anstiegen in Abb. 4.28 und Abb. 4.29 übereinstimmt und wieder auf die Schädigung der SZL zurückzuführen ist, wogegen der Sekantenmodul nach einem Einschwingvorgang konstant bleibt.

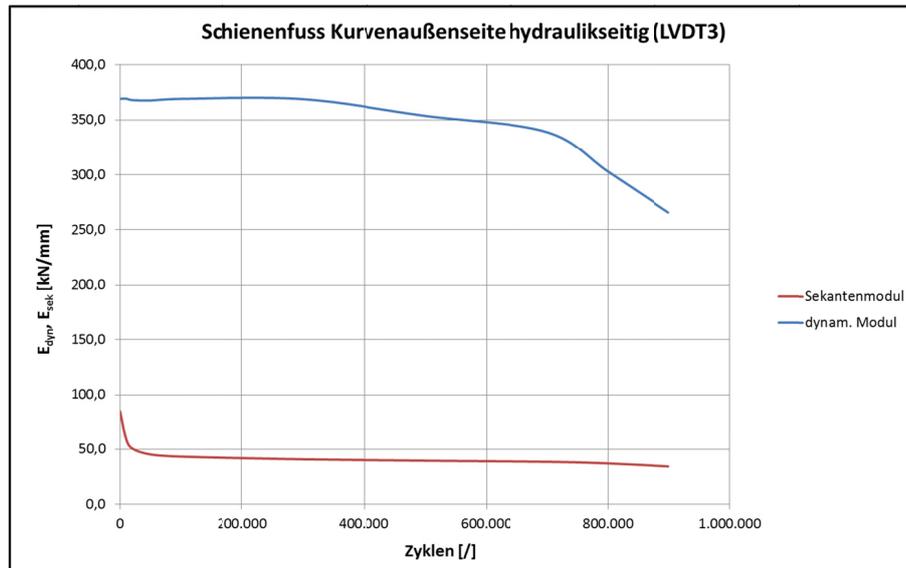


Abb. 4.33: Änderung des dynamischen Moduls und des Sekantenmoduls über die Zykluszahl.

Diese Schädigung der SZL erkennt man auch deutlich in Abb. 4.34. Durch die dynamische Belastung ist in den beiden rot markierten Bereichen trotz des frühzeitigen Versuchsabbruchs starker Verschleiß an der seitlichen Lasche der Kurvenaußenseite entstanden.



Abb. 4.34: Zusätzliche Prüfplatte ZW 700 nach dem abgebrochenen Dauerschwingversuch.

4.5.3 Verifizierung der Ergebnisse

Aufgrund des frühzeitigen Abbruchs war die Ermittlung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems sowie des Durchschubwiderstandes nach dem Dauerschwingversuch nicht möglich.

Betrachtet man die Ergebnisse der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems vor dem Dauerversuch, so zeigt sich, dass die Kurven beim zweiten Versuch deutlich gleichmäßiger waren als beim ersten. Die Abweichung der einzelnen LVDT's zueinander lag innerhalb der Toleranz von 20 % womit die geforderte Gleichmäßigkeit der Einsenkungen gegeben war. Die Unterschiede der Einsenkungen können voraussichtlich durch eine andere Platzierung der LVDT's reduziert werden.

Trotz des frühzeitigen Abbruchs des Dauerschwingversuches konnte gezeigt werden, dass die Kraft nun vollständig in die Schiene und in weiterer Folge in die SZL geleitet wird. Dies spiegelte sich in den deutlich höheren Einsenkungen wider, die nun bis etwa 1 Mio. Zyklen annähernd jenen des alternativen Prüfinstituts entsprachen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Seit mehr als 30 Jahren werden im Eisenbahnoberbau Elastomere in unterschiedlichen Varianten eingesetzt, so auch in Form von Schienenzwischenlagen zwischen Schwelle und Schiene. Um die unterschiedlichsten Anforderungen an Steifigkeit, Dämpfungsverhalten und Oberflächenhaftung zu überprüfen, wurde vor einigen Jahren die EN 13146 entwickelt, die alle Informationen zur Charakterisierung von Schienenzwischenlagen beinhaltet.

Davon ausgehend wurde im Zuge dieser Masterarbeit der in der Norm geforderte Prüfaufbau zur Bestimmung der statischen und der niederfrequenten Steifigkeiten an Schienenzwischenlagen im unverbauten Zustand für das Bauteilprüffeld adaptiert. Zur Implementierung des Versuches wurden von Semperit Technische Produkte GmbH verschiedene Elastomerplatten unterschiedlicher Steifigkeiten zur Verfügung gestellt, die bereits vorab von einem alternativen Prüfinstitut geprüft wurden.

Zur Vereinfachung des Versuchsprogrammes wurden die Bestimmung der statischen und der dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten bei 3 verschiedenen Prüffrequenzen in einem Versuch mit einer Ruhezeit von jeweils 1 min zwischen den Prüfungen zusammengeführt. Um sowohl den Mullins- als auch den Payne-Effekt zu minimieren und vergleichbare Messwerte zu erhalten wurden, abhängig von der Prüffrequenz, eine unterschiedliche Anzahl von Einschwingzyklen gefahren.

Um die Steifigkeit ermitteln zu können, wurden die Kraft-Verformungskurven der einzelnen Platten ausgewertet und dabei die Steifigkeit als dynamischer Modul zwischen zwei definierten Kraftgrenzen berechnet. Die anfängliche „Kartoffelform“ der Kurven konnte nach Herausrechnen einer durch das externe Messsystem bedingten Zeitverschiebung der Signale stark verbessert und somit plausible Werte für die statischen und dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten ermittelt werden.

Gleichzeitig wurde die Implementierung desselben Prüfaufbaus auf einer servohydraulischen Prüfmaschine der Fa. MTS Systems GmbH durchgeführt. Grund dafür war, ein alternative Messsystem sowie eine bessere Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten. Auch hier wurden die gleichen Elastomerplatten und Belastungen geprüft.

Diese Vergleichsmessungen haben gezeigt, dass die an der Montanuniversität Leoben ermittelten Messwerte zwar geringfügig unter denen des alternativen Prüfinstituts liegen,

im Allgemeinen jedoch in derselben Größenordnung liegen und die Werte von Bauteilprüffeld und servo-hydraulischen Prüfmaschine sogar gleich auf liegen.

Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Versuche wurden an beiden Maschinen einerseits acht zusätzliche Elastomerplatten des gleichen Typs, andererseits eine Prüfplatte mehrmals hintereinander geprüft. Mit Abweichungen von $\pm 4 \%$ bzw. $\pm 1,5 \%$ konnte gezeigt werden, dass auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

Des Weiteren wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein Prüfaufbau konstruiert und gebaut, mit dem Schienenzwischenlagen im komplett verbauten Zustand an der Betonschwelle zur Simulation von Bogenfahrten geprüft werden können. Bei der Auslegung des Prüfstandes musste darauf geachtet werden, dass dieser einerseits flexibel genug ist um die verschiedenen Winkel und die Austauschbarkeit einiger Elemente zu gewährleisten. Andererseits war auch eine hohe Steifigkeit notwendig um Belastungen von bis zu 120 kN aufnehmen zu können. Zusätzlich mussten die, durch die Schrägstellung des Systems auftretenden, Querkräfte auf den Hydropulser abgefangen und umgeleitet werden, was mit Hilfe eines Querträgers gelang, der anfangs noch am Prüfstand und später am Prüffeldrahmen montiert wurde. Um trotzdem die für die Krafteinleitung nötige Flexibilität zu erhalten wurde ein bewegliches Adapterstück entwickelt, das die Bewegungen der einsinkenden Schienenzwischenlage und in weiterer Folge der Schiene ausgleichen konnte.

Auch die Bestimmung des Durchschubwiderstandes der Schiene in Längsrichtung war mit demselben Prüfstand durchzuführen. Dafür wurde die Schwelle inklusive Schienenzwischenlage, Schiene und Befestigungssystem um 90° zur Seite gekippt und mit Halterungen aus Holz fixiert. Das Aufbringen der Kraft erfolgte in diesem Fall auf Druck bis ein Durchrutschen der Schiene einsetzte. Es hat sich gezeigt, dass die so ermittelten Werte im Allgemeinen sehr gut mit jenen des alternativen Prüfinstituts übereinstimmen und die Bestimmung des Durchschubwiderstandes somit implementiert werden konnte.

Um die Bestimmung der statischen Steifigkeit des Befestigungssystems durchführen zu können, wurde die Schwelle samt Befestigungssystem wieder zurückgedreht und ein Distanzstück eingelegt, das die Vorneigung der Schiene ausgleichen sollte. Die anschließende statische Belastung hat gezeigt, dass bei der Durchführung des Versuches besonders stark auf die Platzierung der LVDT´s geachtet werden muss.

Zur Durchführung des Dauerschwingversuches wurde das gesamte System auf 33° schräggestellt und dynamisch mit einer Kraft von 90 kN bei 4 Hz über 3 Mio. Zyklen belastet. Bei der Auswertung des ersten Versuches wurde festgestellt, dass der am Prüfstand montierte Querträger nicht geeignet war und durch einen am Prüffeldrahmen montierten Querträger ersetzt werden musste.

Der zweite Versuch musste zwar nach etwa 1,3 Mio. Zyklen auf Grund eines durchrutschenden Lagerungsbolzens abgebrochen werden, jedoch waren hier die gemessenen Einsenkungen deutlich höher und annähernd im gleichen Bereich, wie die Messwerte des alternativen Prüfinstituts. Auch konnte gezeigt werden, dass die eingeleiteten Kräfte einen Einfluss sowohl auf den Sekantenmodul als auch auf den dynamischen Modul haben, der in Form eines Abfalls der Moduli mit zunehmendem Verschleiß der Schienenzwischenlage auftritt. Dieser Einfluss zeigte sich auch an der Schienenzwischenlage direkt, die nach dem zweiten Versuch einen starken Verschleiß aufwies.

6 AUSBLICK

Die Implementierung der Versuchsreihe ist, wie bereits erwähnt, gelungen. Allerdings hat sich vor allem im Bereich der Belastungen am Befestigungssystem durch den Einbau des neuen Querträgers die Möglichkeit ergeben, die Bestimmung des Durchschubwiderstandes auf Zug durchzuführen. Dies würde die ermittelten Werten noch besser vergleichbar machen und den Anforderungen aus der EN 13146-1 besser entsprechen.

Für eine solche Anordnung müsste die Zugkraft vom Hydropulser über ein Seilsystem und am Prüffeldrahmen montierte Umlenkrollen in die Schiene an der nicht gekippten Schwelle geleitet werden. Ein Konzept zur Umsetzung dieser Prüfanordnung wurde bereits erarbeitet und liegt zur weiteren Bearbeitung bereit.

Die technischen Probleme beim zweiten Versuch können mit kleineren Adaptierungen behoben werden. Sobald dies geschehen ist, wäre es sinnvoll einige vollständige Versuchsabläufe am Stück durchzuführen um einerseits die Abläufe zu verbessern und andererseits Messwerte für die Weiterentwicklung der Schienenzwischenlage sowie des Befestigungssystems zu erhalten.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Besdo, D., & Ihlemann, J. (1996). Zur Modellierung des Stoffverhaltens von Elastomeren. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 49, S. 495-503.
- Büche, F. (1961). Mullins-Effect and Rubber-Filler Interaction. *Journal of Applied Polymer Science*, 5, S. 271-281.
- Deischl, F., Fenner, J., Grabe, W., & Günzel, W. (1995). Elastomere im Eisenbahnoberbau. In *Elastomere im Bauwesen* (S. 217-227). VDI Verlag.
- Ehrenstein, G., Riedel, G., & Trawiel, P. (2003). *Praxis der Thermischen Kunststoffen*. München: Hanser Verlag.
- EN 13146. (2012). Bahnanwendungen - Oberbau - Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme. Wien: Österreichisches Normungsinstitut;
- EN 13481-2. (2012). Bahnanwendungen - Oberbau - Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme. *Teil 2: Befestigungssysteme für Betonschwellen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- Engst, W. (1992). Elastomere zum Schwingungs- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. In *Technische Problemlösungen mit Elastomeren* (S. 113 - 135). VDI Verlag.
- Getzner Werkstoffe GmbH. (2013). *getzner - the good vibrations company*. (Getzner Werkstoffe GmbH) Abgerufen am 1. 10 2013 von www.getzner.com
- Gohl, W. (1983). *Elastomere - Dicht- und Konstruktionswerkstoffe*. Grafenau: expert Verlag.
- Gowdner, M. R. (1996). Application of Constitutive Modeling to the Linear and Nonlinear Viscoelastic Behaviour of Nitrile Rubber. *Dissertation*. Texas: Texas A&M University.
- Grambow, A. (2003). Bestimmung der Materialparameter gefüllter Elastomere in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur und Beanspruchungszustand. *Dissertation*. Aachen: Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen.
- Harwood, J., Mullins, L., & Payne, A. (1966). Stress Softening in Natural Rubber Vulcanizates, Part II, Stress Softening Effects in Pure Gum and Filler Loaded Rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 9, S. 3011-3021.

HBM GmbH. (2013). *HBM Messtechnik*. (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) Abgerufen am 4. 10 2013 von www.hbm.com

Heinrich, G. (1997). Struktur, Eigenschaften und Praxisverhalten vom Gummi – vom Polymeren Netzwerk zum dynamisch beanspruchten Reifen (Teil 2). *Gummi Fasern Kunststoffe*, 50, S. 775-781.

Herbst, W., & Waßmann, R. (1983). Untersuchungen zur Entwicklung geräuschkämpfender Schienenbefestigungen. (B. Forschungsprogramm, Hrsg.) *Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden, Teilprogramm Schienennahverkehr*(Bericht 11).

Holzner, A. (2012). Grundlagen der Elastomertechnologie. *Vorlesungsunterlagen Elastomertechnologie I*. Leoben: Semperit AG.

<http://youtu.be/9jBUTNRYKAo>. (2013). Bewegung des Prüfstandes. Abgerufen am 29. 10 2013 von www.youtu.be/9jBUTNRYKAo

http://youtu.be/i1Kyoei3_2k. (2013). Messung der Stempelverschiebung.

Jaquet, T., Krüger, F., & Repczuk, A. (2006). Schwingungsminderung im Schienenverkehr. In F. Krüger, & und 7 Mitautoren, *Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr*. Renningen: expert verlag.

Krüger, F., & Kasten, P. (1994). Demonstrationsvorhaben zum Einsatz von Schienendämpfungselementen auf Vollbahnstrecken zur Verminderung des Kurvenquietschens. (B. F. 9049, Hrsg.) *Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden*.

Lion, A. (2006). Dynamische Modellierung von elastomeren Bauteilen. *Geräusch- und Schwingungskomfort von Kraftfahrzeugen*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München.

Morrison, N., & Porter, M. (1984). Temperature Effects on the Stability of Intermediates and Crosslinks in Sulfur Vulcanization. *Rubber Chemistry and Technology*, 57(1), S. 63-85.

Müller-Boruttau, H., & Breitsamter, N. (2003). *Zur Dimensionierung Elastischer Elemente des Oberbaus*. Abgerufen am 09. 09 2013 von <http://www.imb-dynamik.de>

Mullins, L. (1969). Softening of Rubber by Deformation. *Rubber Chemistry and Technology*, 42(1), S. 339-362.

- Nagadi, K. (1993). *Rubber as an Engineering Material: Guidelines for Users*. Korntal-Münchingen: Carl Hanser Verlag.
- ÖBB-Infrastruktur AG. (2013). *ÖBB Infra*. (ÖBB-Infrastruktur AG) Abgerufen am 1. 10 2013 von www.oebb.at/infrastruktur
- Payne, A. R. (1958). *The Rheology of Elastomers*. (P. Mason, & N. Wookey, Hrsg.) London: Pergamon Press.
- Payne, A. R. (1962). Non Linearity in the Dynamic Properties of Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 35, S. 218-241.
- Payne, A. R. (1962). The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. *Journal of Applied Polymer Science*, 6, S. 57-63.
- Payne, A., & Whittaker, R. (1971). Low Strain Dynamic Properties of Filled Rubbers. *Rubber Chemistry and Technology*, 44, S. 440-478.
- Röthemeyer, F., & Sommer, F. (2006). *Kautschuk Technologie*. München: Carl Hanser Verlag München Wien.
- Schneider, C., & Pompenig, A. (2013). Innovation für Zukunftsmärkte. *Sonderbeilage "Exzellenz in Forschung, Lehre, Weiterbildung"*.
- Schrittesser, B. (2012). Simulation Elastomere. *Vorlesungsunterlagen Kunststoffeigenschaften und Bauteilverhalten*. Leoben: Polymer Competence Center Leoben GmbH.
- Sedlan, K. (2000). Viskoelastisches Materialverhalten von Elastomerwerkstoffen: Experimentelle Untersuchung und Modellbildung. Kassel: Universität Gesamthochschule Kassel.
- Statistik Austria. (2011). Abgerufen am 21.. September 2013 von <http://www.statistik.at>
- Studer, J., & Ziegler, A. (1986). *Bodendynamik*. Berlin: Springer-Verlag.
- Umweltbundesamt. (1986/87). *Daten zur Umwelt*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- Vezer, S. (2011). Experimental and numerical characterization of the fretting fatigue behavior of elastomers. *Dissertation*. Leoben: Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe.

ANHANG

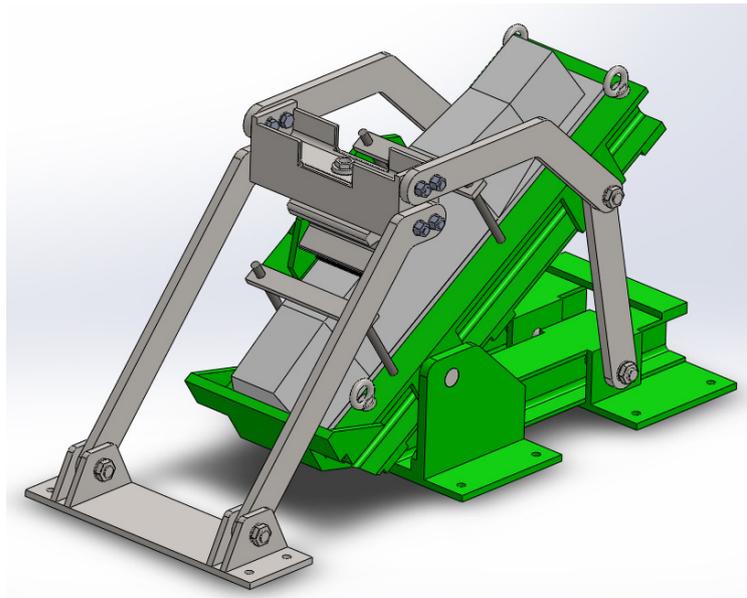
Anhang A – Mechanische Auslegungen	93
Anhang B1 – Konstruktionszeichnungen Prüfstand	112
Anhang B2 – Konstruktionszeichnungen Querträger	150
Anhang C1 – Messdatenblätter Prüffeld	164
Anhang C2 – Messdatenblätter MTS 322.....	191
Anhang C3 – Messdatenblätter Prüffeld – Vergleichsmessungen.....	204
Anhang C4 – Messdatenblätter MTS 322 – Vergleichsmessungen	236

ANHANG A – MECHANISCHE AUSLEGUNGEN

Mechanische Auslegung

eines Prüfstandes

zur dynamischen Charakterisierung von
Schienenzwischenlagen



Berechnung eines Prüfaufbaus**Vorgabewerte**

$$F := 120 \text{ kN}$$

$$q := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$l := 1400 \text{ mm}$$

$$l_A := 400 \text{ mm}$$

$$l_B := 1100 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Gewicht}} := 650 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Schwelle}} := 1300 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Kraftangriff}} := 560 \text{ mm}$$

$$b_{\text{Schwelle}} := \left(\frac{300 + 170}{2} \right) \text{ mm}$$

$$h_{\text{Schiene}} := 172 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Gummiplate}} := 10 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Stahlplatte}} := 20 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Holzplatte}} := 20 \text{ mm}$$

$$h_{\text{Profile}} := 160 \text{ mm}$$

$$h := h_{\text{Schiene}} + h_{\text{Gummiplate}} + h_{\text{Schwelle}} + h_{\text{Holzplatte}} + h_{\text{Stahlplatte}} + h_{\text{Profile}}$$

$$h = 596 \text{ mm}$$

Kräfte- und Momentengleichgewicht

$$\sum_i F_x = 0 = -F_x - F_{Gx} + F_{Ax} + F_{Bx}$$

$$\sum_i F_y = 0 = -F_y - F_{Gy} + F_{Ay} + F_{By}$$

$$\sum_i M_A = 0 = F_{Gy} \cdot \left(\frac{l_{\text{Schwelle}}}{2} - l_A \right) + F_y \cdot (l_{\text{Kraftangriff}} - l_A) - F_{By} \cdot (l_B - l_A) - F_x \cdot h - F_{Gx} \cdot 100 \text{ mm}$$

für $\alpha_{\text{max}} := 45^\circ$

$$F_{x45} := F \cdot \sin(\alpha_{\text{max}})$$

$$F_{x45} = 84.85 \text{ kN}$$

$$F_{y45} := F \cdot \cos(\alpha_{\text{max}})$$

$$F_{y45} = 84.85 \text{ kN}$$

$$F_{Gx45} := q \cdot l_{\text{Schwelle}} \cdot \sin(\alpha_{\text{max}})$$

$$F_{Gx45} = 2.76 \text{ kN}$$

$$F_{Gy45} := q \cdot l_{\text{Schwelle}} \cdot \cos(\alpha_{\text{max}})$$

$$F_{Gy45} = 2.76 \text{ kN}$$

$$F_{By45} := \frac{F_{Gy45} \cdot \left(\frac{l_{schwelle}}{2} - l_A \right) + F_{y45} \cdot (l_{kraftangriff} - l_A) - F_{x45} \cdot h - F_{Gx45} \cdot 100\text{mm}}{l_B - l_A}$$

$$F_{By45} = -52.26 \text{ kN}$$

$$F_{Bx45} := F_{By45} \cdot \tan(\alpha_{\max} - 15^\circ)$$

$$F_{Bx45} = -30.17 \text{ kN}$$

$$F_{B45} := \sqrt{F_{Bx45}^2 + F_{By45}^2}$$

$$F_{B45} = 60.34 \text{ kN}$$

$$F_{Ay45} := F_{y45} + F_{Gy45} - F_{By45}$$

$$F_{Ay45} = 139.87 \text{ kN}$$

$$F_{Ax45} := F_{x45} + F_{Gx45} - F_{Bx45}$$

$$F_{Ax45} = 117.78 \text{ kN}$$

$$F_{A45} := \sqrt{F_{Ax45}^2 + F_{Ay45}^2}$$

$$F_{A45} = 182.86 \text{ kN}$$

$$\alpha_{A45} := \text{atan}\left(\frac{F_{Ax45}}{F_{Ay45}}\right)$$

$$\alpha_{A45} = 40.1^\circ$$

für $\alpha_{\min} := 25^\circ$

$$F_x := F \cdot \sin(\alpha_{\min})$$

$$F_x = 50.71 \text{ kN}$$

$$F_y := F \cdot \cos(\alpha_{\min})$$

$$F_y = 108.76 \text{ kN}$$

$$F_{Gx} := q \cdot l_{schwelle} \cdot \sin(\alpha_{\min})$$

$$F_{Gx} = 1.65 \text{ kN}$$

$$F_{Gy} := q \cdot l_{schwelle} \cdot \cos(\alpha_{\min})$$

$$F_{Gy} = 3.53 \text{ kN}$$

$$F_{By} := \frac{F_{Gy} \cdot \left(\frac{l_{schwelle}}{2} - l_A \right) + F_y \cdot (l_{kraftangriff} - l_A) - F_x \cdot h - F_{Gx} \cdot 100\text{mm}}{l_B - l_A}$$

$$F_{By} = -17.29 \text{ kN}$$

$$F_{Bx} := F_{By} \cdot \tan(\alpha_{\min} - 7^\circ)$$

$$F_B := \sqrt{F_{Bx}^2 + F_{By}^2}$$

$$F_{Ay} := F_y + F_{Gy} - F_{By}$$

$$F_{Ax} := F_x + F_{Gx} - F_{Bx}$$

$$F_A := \sqrt{F_{Ax}^2 + F_{Ay}^2}$$

$$\alpha_A := \operatorname{atan}\left(\frac{F_{Ax}}{F_{Ay}}\right)$$

maximale Werte (gewählt mit dynamischer Sicherheit) $S_{\text{Dym}} := 3,5$

$$F_{A\text{max}} := S_{\text{Dym}} \cdot F_{A45}$$

$$F_{B\text{max}} := S_{\text{Dym}} \cdot F_{B45}$$

Schwerpunktberechnung

$$y_{\text{Schwelle}} := \frac{h_{\text{Schwelle}}}{2} + h_{\text{Holzplatte}} + h_{\text{Stahlplatte}} + h_{\text{Profil}}$$

$$y_{\text{Stahlplatte}} := \frac{h_{\text{Stahlplatte}}}{2} + h_{\text{Profil}}$$

$$y_{\text{Profil}} := \frac{h_{\text{Profil}}}{2}$$

$$A_{\text{Schwelle}} := b_{\text{Schwelle}} \cdot h_{\text{Schwelle}}$$

$$F_{Bx} = -5,62 \text{ kN}$$

$$F_B = 18,18 \text{ kN}$$

$$F_{Ay} = 129,59 \text{ kN}$$

$$F_{Ax} = 57,98 \text{ kN}$$

$$F_A = 141,97 \text{ kN}$$

$$\alpha_A = 24,11^\circ$$

$$F_{A\text{max}} = 640 \text{ kN}$$

$$F_{B\text{max}} = 211,21 \text{ kN}$$

$$b_{\text{Profile}} := 160 \text{ mm}$$

$$b_{\text{Stahlplatte}} := 2 \cdot b_{\text{Profile}} + 180 \text{ mm}$$

$$b_{\text{Stahlplatte}} = 500 \text{ mm}$$

$$A_{\text{Stahlplatte}} := b_{\text{Stahlplatte}} \cdot h_{\text{Stahlplatte}}$$

$$A_{\text{Profile}} := 54.3 \text{ cm}^2$$

$$y_s := \frac{y_{\text{Schwelle}} \cdot A_{\text{Schwelle}} + y_{\text{Stahlplatte}} \cdot A_{\text{Stahlplatte}} + 2 \cdot y_{\text{Profile}} \cdot A_{\text{Profile}}}{A_{\text{Schwelle}} + A_{\text{Stahlplatte}} + 2 \cdot A_{\text{Profile}}}$$

$$y_s = 253.1 \text{ mm}$$

Maximales Biegemoment (im Bereich 3. Seite 8 und 9)

$$M_{3x} = -q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{x_3^2}{2} + F_{Ay45} \cdot (x_3 - l_A) - F_{x45} \cdot h - F_{y45} \cdot (x_3 - l_{\text{Kraftangriff}})$$

$$M_{3\text{max}} := S_{\text{Dyn}} \cdot \left[-q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{l_{\text{Kraftangriff}}^2}{2} + F_{Ay45} \cdot (l_{\text{Kraftangriff}} - l_A) - F_{x45} \cdot h - F_{y45} \cdot (l_{\text{Kraftangriff}} - l_{\text{Kraftangriff}}) \right]$$

$$M_{3\text{max}} = -99.84 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

gewählt:

$$M_{3\text{max}} := -110 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Berechnung der Profile auf Biegung

Berechnung der Trägheitsmomente

$$I_{\text{Beton}} := \frac{b_{\text{Schwelle}} \cdot (h_{\text{Schwelle}})^3}{12} + (y_{\text{Schwelle}} - y_s)^2 \cdot A_{\text{Schwelle}}$$

$$I_{\text{Beton}} = 3.38 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{Stahlplatte}} := \frac{b_{\text{Stahlplatte}} \cdot I_{\text{Stahlplatte}}^3}{12} + (y_{\text{Stahlplatte}} - y_s)^2 \cdot A_{\text{Stahlplatte}}$$

$$I_{\text{Stahlplatte}} = 6.94 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$I_{\text{Profile}} := 2 \cdot \left[2490 \cdot \text{cm}^4 + (y_{\text{Profile}} - y_s)^2 \cdot A_{\text{Profile}} \right] \quad I_{\text{Profile}} = 3.75 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

Berechnung der maximalen Durchbiegung an Stelle $x := l_{\text{Kraftangriff}}$

$$E_{\text{Stahl}} := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad E_{\text{Beton}} := 30000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sum_i (E_i \cdot I_i) \cdot w_{\text{II}}(x) = -M(x) = \left[-q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{x^2}{2} + F_{\text{Ay45}} \cdot (x - l_A) - F_{\text{x45}} \cdot h - F_{\text{y45}} \cdot (x - l_{\text{Kraftangriff}}) \right]$$

$$\sum_i (E_i \cdot I_i) \cdot w_i'(x) = q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{x^3}{6} - F_{\text{Ay45}} \cdot \frac{x^2}{2} + F_{\text{Ay45}} \cdot l_A \cdot x + F_{\text{x45}} \cdot h \cdot x + F_{\text{y45}} \cdot \frac{x^2}{2} - F_{\text{y45}} \cdot l_{\text{Kraftangriff}} \cdot x + c_1$$

$$\sum_i (E_i \cdot I_i) \cdot w_i''(x) = q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{x^4}{24} - F_{\text{Ay45}} \cdot \frac{x^3}{6} + F_{\text{Ay45}} \cdot l_A \cdot \frac{x^2}{2} + F_{\text{x45}} \cdot h \cdot \frac{x^2}{2} - F_{\text{y45}} \cdot l_{\text{Kraftangriff}} \cdot \frac{x^2}{2} + c_1 \cdot x + c_2$$

$$\text{mit } w_i'(x = l_{\text{Gewicht}}) = 0 \quad \rightarrow \quad c_1 := - \left(q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{l_{\text{Gewicht}}^3}{6} - F_{\text{Ay45}} \cdot \frac{l_{\text{Gewicht}}^2}{2} + F_{\text{Ay45}} \cdot l_A \cdot l_{\text{Gewicht}} + F_{\text{x45}} \cdot h \cdot l_{\text{Gewicht}} + F_{\text{y45}} \cdot \frac{l_{\text{Gewicht}}^2}{2} - F_{\text{y45}} \cdot l_{\text{Kraftangriff}} \cdot l_{\text{Gewicht}} \right)$$

$$\text{mit } w_i(x = l_A) = 0 \quad \rightarrow \quad c_2 := - \left(q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{l_A^4}{24} - F_{\text{Ay45}} \cdot \frac{l_A^3}{6} + F_{\text{Ay45}} \cdot l_A \cdot \frac{l_A^2}{2} + F_{\text{x45}} \cdot h \cdot \frac{l_A^2}{2} - F_{\text{y45}} \cdot l_{\text{Kraftangriff}} \cdot \frac{l_A^2}{2} + c_1 \cdot l_A \right)$$

$$w_{\text{max}} := \frac{S_{\text{Dyn}} \cdot \left(q \cdot \sin(\alpha_{\text{max}}) \cdot \frac{x^4}{24} - F_{\text{Ay45}} \cdot \frac{x^3}{6} + F_{\text{Ay45}} \cdot l_A \cdot \frac{x^2}{2} + F_{\text{x45}} \cdot h \cdot \frac{x^2}{2} + F_{\text{y45}} \cdot \frac{x^3}{6} - F_{\text{y45}} \cdot l_{\text{Kraftangriff}} \cdot \frac{x^2}{2} + c_1 \cdot x + c_2 \right)}{E_{\text{Beton}} \cdot I_{\text{Beton}} + E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{Stahlplatte}} + E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{Profile}}}$$

$$w_{\text{max}} = -0.03 \text{ mm}$$

Maximales Biegemoment ermitteln:

$$x_1 := 0\text{mm}, 0.5\text{mm} \dots l_A$$

$$x_2 := l_A \cdot (l_A + 0.5\text{mm}) \dots l_{\text{Kraftangriff}}$$

$$x_3 := l_{\text{Kraftangriff}} \cdot (l_{\text{Kraftangriff}} + 0.5\text{mm}) \dots l_{\text{Gewicht}}$$

$$x_4 := l_{\text{Gewicht}} \cdot (l_{\text{Gewicht}} + 0.5\text{mm}) \dots l_B$$

$$x_5 := l_B \cdot (l_B + 0.5\text{mm}) \dots (l - 100\text{mm})$$

bei $\alpha=45^\circ$:

$$M_{145}(x_1) := -q \cdot \sin(\alpha_{\max}) \cdot \frac{x_1^2}{2}$$

$$M_{245}(x_2) := -q \cdot \sin(\alpha_{\max}) \cdot \frac{x_2^2}{2} + F_{Ay45} \cdot (x_2 - l_A)$$

$$M_{345}(x_3) := -q \cdot \sin(\alpha_{\max}) \cdot \frac{x_3^2}{2} + F_{Ay45} \cdot (x_3 - l_A) - F_{x45} \cdot h - F_{y45} \cdot (x_3 - l_{\text{Kraftangriff}})$$

$$M_{445}(x_4) := -q \cdot \sin(\alpha_{\max}) \cdot \frac{x_4^2}{2} + F_{Ay45} \cdot (x_4 - l_A) - F_{x45} \cdot h - F_{y45} \cdot (x_4 - l_{\text{Kraftangriff}}) - F_{Gx45} \cdot 100\text{mm}$$

$$M_{545}(x_5) := -q \cdot \sin(\alpha_{\max}) \cdot \frac{x_5^2}{2} + F_{Ay45} \cdot (x_5 - l_A) - F_{x45} \cdot h - F_{y45} \cdot (x_5 - l_{\text{Kraftangriff}}) - F_{Gx45} \cdot 100\text{mm} + F_{By45} \cdot (x_5 - l_B)$$

bei $\alpha=25^\circ$:

$$M_1(x_1) := -q \cdot \sin(\alpha_{\min}) \cdot \frac{x_1^2}{2}$$

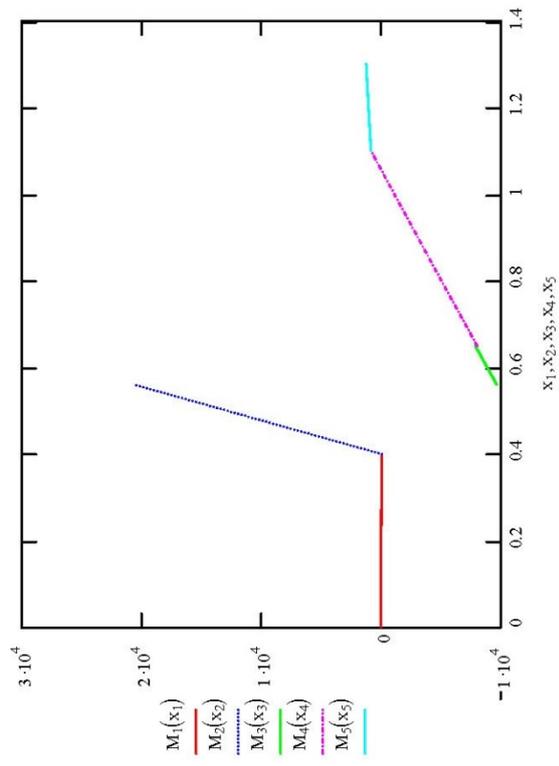
$$M_2(x_2) := -q \cdot \sin(\alpha_{\min}) \cdot \frac{x_2^2}{2} + F_{Ay} \cdot (x_2 - l_A)$$

$$M_3(x_3) := -q \cdot \sin(\alpha_{\min}) \cdot \frac{x_3^2}{2} + F_{Ay} \cdot (x_3 - l_A) - F_x \cdot h - F_y \cdot (x_3 - l_{\text{Kraftangriff}})$$

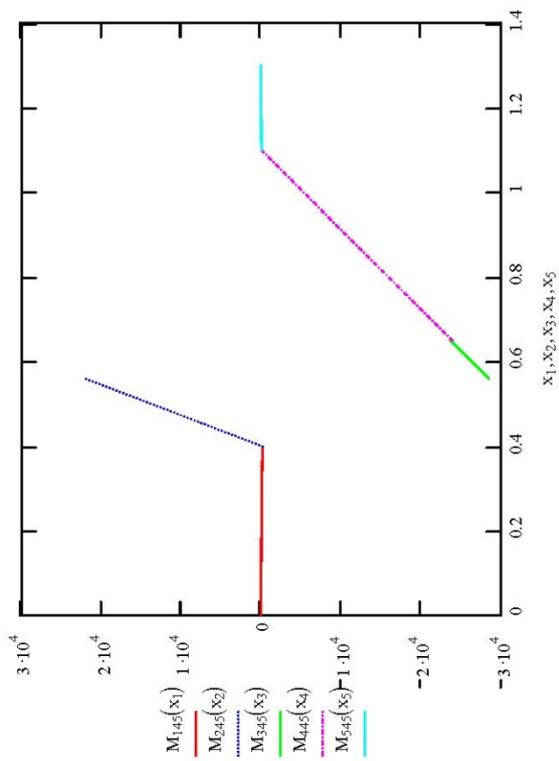
$$M_4(x_4) := -q \cdot \sin(\alpha_{\min}) \cdot \frac{x_4^2}{2} + F_{Ay} \cdot (x_4 - l_A) - F_x \cdot h - F_y \cdot (x_4 - l_{\text{Kraftangriff}}) - F_{Gx} \cdot 100\text{mm}$$

$$M_5(x_5) := -q \cdot \sin(\alpha_{\min}) \cdot \frac{x_5^2}{2} + F_{Ay} \cdot (x_5 - l_A) - F_x \cdot h - F_y \cdot (x_5 - l_{\text{Kraftangriff}}) - F_{Gx} \cdot 100\text{mm} + F_{By} \cdot (x_5 - l_B)$$

bei $\alpha=25^\circ$:



bei $\alpha=45^\circ$:



Berechnung der Bolzenverbindungen auf AbscherenStelle A:

$$\tau_{\text{azul}} := 60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

für Bolzenverbindungen aus Stahl mit schwellender Belastung
lt. Decker Maschinenelemente Tab. 13.1

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot A} \quad A = \frac{d_{\text{erf}}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$d_{\text{Aerf}} := \sqrt{\frac{4F_{\text{A45}}}{\pi \cdot 2 \cdot \tau_{\text{azul}}}}$$

$$d_{\text{Aerf}} = 44.05 \text{ mm}$$

gewählt:

$$d_{\text{Bolza}} := 55 \text{ mm}$$

Stelle B:

$$d_{\text{Berf}} := \sqrt{\frac{4F_{\text{B45}}}{\pi \cdot 2 \cdot \tau_{\text{azul}}}}$$

$$d_{\text{Berf}} = 25.3 \text{ mm}$$

gewählt:

$$d_{\text{Bolzb}} := 40 \text{ mm}$$

Berechnung der Abstützungen auf Knicken

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(0.5 \cdot L)^2} \quad I_{\text{erf}} = 2 \frac{b_{\text{erf}} \cdot d^3}{12}$$

$$L := 800 \text{ mm}$$

$$I_{\text{erf}} := \frac{F_{B_{\text{max}}} \cdot (0.5 \cdot L)^2}{E_{\text{Stahl}} \cdot \pi^2}$$

$$b_{\text{erf}} := \frac{12 \cdot I_{\text{erf}}}{2 \cdot (30 \text{ mm})^3}$$

$$I_{\text{erf}} = 1.63 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

$$b_{\text{erf}} = 3.62 \text{ mm}$$

gewählt:

$$b := 60 \text{ mm}$$

Berechnung der Abstützungen auf Zug

$$A = s_{\text{erf}} \cdot b_{\text{Halterung}}$$

$$b_{\text{Halterung}} := 100 \text{ mm} - d_{\text{BolzB}}$$

$$\sigma_{\text{Zzul}} := 60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$s_{\text{erf}} := \frac{F_{B_{\text{ZS}}}}{2 \cdot \sigma_{\text{Zzul}} \cdot b_{\text{Halterung}}}$$

$$s_{\text{erf}} = 8.38 \text{ mm}$$

Berechnung eines Prüfaufbaus

$$^{\circ} := \frac{\pi}{180} \text{rad}$$

Vorgabewerte

$$l_{\text{Auflager}} := 700 \text{mm}$$

$$h_2 := 280 \text{mm} - 80 \text{mm}$$

$$h_2 = 200 \text{mm}$$

Berechnungen der Stützlängen für unterschiedliche Winkel

Länge der Stütze für $\alpha := 33^{\circ}$

$$l_1 := l_{\text{Auflager}} \cdot \cos(\alpha)$$

$$l_1 = 587.069 \text{mm}$$

$$h_1 := \sqrt{l_{\text{Auflager}}^2 - l_1^2}$$

$$h_1 = 381.247 \text{mm}$$

$$l_2 := l_{\text{Auflager}} - l_1$$

$$l_2 = 112.931 \text{mm}$$

$$l_{\text{Stütze33}} := \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + l_2^2}$$

$$l_{\text{Stütze33}} = 592.116 \text{mm}$$

Länge der Stütze für $\alpha := 26^{\circ}$

$$l_1 := l_{\text{Auflager}} \cdot \cos(\alpha)$$

$$l_1 = 629.156 \text{mm}$$

$$h_1 := \sqrt{l_{\text{Auflager}}^2 - l_1^2}$$

$$h_1 = 306.86 \text{mm}$$

$$l_2 := l_{\text{Auflager}} - l_1$$

$$l_2 = 70.844 \text{mm}$$

$$l_{\text{Stütze26}} := \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + l_2^2}$$

$$l_{\text{Stütze26}} = 511.787 \text{ mm}$$

$$\gamma_{26} := \arctan\left(\frac{l_2}{h_1 + h_2}\right)$$

$$\gamma_{26} = 7.957^\circ$$

Länge der Stütze für $\alpha := 38.6^\circ$

$$l_1 := l_{\text{Auflager}} \cdot \cos(\alpha)$$

$$l_1 = 547.064 \text{ mm}$$

$$h_1 := \sqrt{l_{\text{Auflager}}^2 - l_1^2}$$

$$h_1 = 436.716 \text{ mm}$$

$$l_2 := l_{\text{Auflager}} - l_1$$

$$l_2 = 152.936 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Stütze38.6}} := \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + l_2^2}$$

$$l_{\text{Stütze38.6}} = 654.825 \text{ mm}$$

Länge der Stütze für $\alpha := 40^\circ$

$$l_1 := l_{\text{Auflager}} \cdot \cos(\alpha)$$

$$l_1 = 536.231 \text{ mm}$$

$$h_1 := \sqrt{l_{\text{Auflager}}^2 - l_1^2}$$

$$h_1 = 449.951 \text{ mm}$$

$$l_2 := l_{\text{Auflager}} - l_1$$

$$l_2 = 163.769 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Stütze40}} := \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + l_2^2}$$

$$l_{\text{Stütze40}} = 670.266 \text{ mm}$$

Länge der Stütze für $\alpha := 45^\circ$

$$l_1 := l_{\text{Auflager}} \cdot \cos(\alpha)$$

$$h_1 := \sqrt{l_{\text{Auflager}}^2 - l_1^2}$$

$$l_2 := l_{\text{Auflager}} - l_1$$

$$l_{\text{Stütze45}} := \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + l_2^2}$$

$$\gamma_{45} := \text{atan}\left(\frac{l_2}{h_1 + h_2}\right)$$

$$l_1 = 494.975 \text{ mm}$$

$$h_1 = 494.975 \text{ mm}$$

$$l_2 = 205.025 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Stütze45}} = 724.586 \text{ mm}$$

$$\gamma_{45} = 16.437^\circ$$

Berechnung des Querträgers NEU

$$kN := 1000N \quad E := 210000 \frac{N}{mm^2} \quad I_{\text{Querkraft}} := 36660cm^4 \quad I_{\text{Durchschub}} := 9690cm^4 \quad L_{\text{Träger}} := 1400mm$$

$$F_{\text{Querkraft}} := 60kN \quad F_{\text{Durchschub}} := 40kN \quad F_{\text{Druck}} := 120kN$$

Berechnung der Durchbiegung bei Querkraft an der Stelle: $x := \frac{L_{\text{Träger}}}{2}$

$$F_A := \frac{F_{\text{Querkraft}}}{2}$$

$$F_A = 30kN$$

$$M(x) = F_A \cdot x$$

$$w_{II}(x) = \frac{-M(x)}{E \cdot I} = \frac{-F_A \cdot x}{E \cdot I}$$

$$w_I(x) = \frac{-F_A \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot I} + c_1 \quad \Rightarrow \text{mit } w_I(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad c_1 := 0$$

$$w(x) = \frac{-F_A \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot I} + c_1 \cdot x + c_2 \quad \Rightarrow \text{mit } w(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad c_2 := 0$$

$$w_{\text{max}} := \frac{-F_A \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot I_{\text{Querkraft}}}$$

$$w_{\text{max}} = -0.022mm$$

$$x := \frac{I_{\text{Träger}}}{2}$$

Berechnung der Durchbiegung bei Durchschub an der Stelle:

$$F_A := \frac{F_{\text{Durchschub}}}{2}$$

$$F_A = 30 \text{ kN}$$

$$w_{\text{max}} := \frac{-F_A \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot I_{\text{Durchschub}}}$$

$$w_{\text{max}} = -0.056 \text{ mm}$$

Berechnung der Bolzenverbindungen auf Abscheren

Stelle A:

$$\tau_{\text{azul}} := 60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

für Bolzenverbindungen aus Stahl mit schwellonder Belastung
lt. Decker Maschinenelemente Tab. 13.1

$$\tau = \frac{F}{2 \cdot A} \quad A = \frac{d_{\text{erf}}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$d_{\text{Aerf}} := \sqrt{\frac{4F_{\text{Druck}}}{\pi \cdot 2\tau_{\text{azul}}}}$$

$$d_{\text{Aerf}} = 35.682 \text{ mm}$$

gewählt: $d_{\text{Bolza}} := 40 \text{ mm}$

Berechnung der Kräfteinleitung**Vorgabewerte**

$$q := 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$I_{\text{Kraft}} := 100 \text{ mm} \quad I_{\text{quer}} := 560 \text{ mm}$$

$$I_1 := \frac{I_{\text{quer}}}{2} - \frac{I_{\text{Kraft}}}{2}$$

$$I_1 = 230 \text{ mm}$$

$$F_q := q \cdot I_{\text{Kraft}}$$

$$F_q = 50 \text{ kN}$$

Kräfte- und Momentengleichgewicht

$$\sum_i F_y = 0 = F_A - F_q + F_B$$

$$\sum_i M_A = 0 = F_q \cdot \frac{I_{\text{quer}}}{2} - F_B \cdot I_{\text{quer}}$$

$$F_B := \frac{F_q \cdot \frac{I_{\text{quer}}}{2}}{I_{\text{quer}}}$$

$$F_B = 25 \text{ kN}$$

$$F_A := F_q - F_B$$

$$F_A = 25 \text{ kN}$$

maximale Werte (gewählt mit dynamischer Sicherheit) $S_{\text{Dyn}} := 3.5$

$$F_{A\text{max}} := S_{\text{Dyn}} \cdot F_A$$

$$F_{A\text{max}} = 87.5 \text{ kN}$$

$$F_{B\text{max}} := S_{\text{Dyn}} \cdot F_B$$

$$F_{B\text{max}} = 87.5 \text{ kN}$$

$$^\circ := \frac{\pi}{180} \text{ rad} \quad \text{kN} := 1000 \text{ N}$$

Maximales Biegemoment (im Bereich 2, Seite 4)

$$M(x_2) = F_A \cdot x_2 - q \cdot (x_2 - l_1) \cdot \left(\frac{x_2 - l_1}{2} \right)$$

$$M_{2max} := S_{Dyn} \cdot \left[F_A \cdot \frac{l_{quer}}{2} - q \cdot \left(\frac{l_{quer}}{2} - l_1 \right) \cdot \left(\frac{\frac{l_{quer}}{2} - l_1}{2} \right) \right]$$

$$M_{2max} = 22.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

gewählt:

$$M_{2max} := 25 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Berechnung der Profile auf Biegung

$$b := 100 \text{ mm}$$

$$h := 100 \text{ mm}$$

$$I := \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I = 833.33 \text{ cm}^4$$

Berechnung der maximalen Durchbiegung an Stelle $x := \frac{l_{quer}}{2}$

$$E_{Stahl} := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad I_{\text{Profil}} := 1510 \text{ cm}^4$$

$$\sum_i (E_i \cdot I_i) \cdot w_{II}(x) = -M(x) = - \left[F_A \cdot x - q \cdot (x - l_1) \cdot \left(\frac{x - l_1}{2} \right) \right]$$

$$\sum_i (E_i \cdot I_i) \cdot w_I(x) = - \left[F_A \cdot \frac{x^2}{2} - \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{x^3}{3} - 2 \cdot l_1 \cdot \frac{x^2}{2} + l_1^2 \cdot x \right) \right] + c_1$$

$$\sum_i (E_i \cdot I_i) \cdot w(x) = - \left[F_A \cdot \frac{x^3}{6} - \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{x^4}{12} - 2 \cdot l_1 \cdot \frac{x^3}{6} + l_1^2 \cdot \frac{x^2}{2} \right) \right] + c_1 \cdot x + c_2$$

$$\text{mit } w_I \left(x = \frac{l_{quer}}{2} \right) = 0 \quad \rightarrow \quad c_1 := F_A \cdot \frac{\left(\frac{l_{quer}}{2} \right)^2}{2} - \frac{q}{2} \cdot \left[\frac{\left(\frac{l_{quer}}{2} \right)^3}{3} - 2 \cdot l_1 \cdot \frac{\left(\frac{l_{quer}}{2} \right)^2}{2} + l_1^2 \cdot \frac{l_{quer}}{2} \right]$$

$$\text{mit } w(0) = 0 \quad \rightarrow \quad c_2 = 0$$

$$w_{\max} := \frac{S_{\text{Dyn}} \cdot \left[-F_A \cdot \frac{x^3}{6} + \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{x^4}{12} - 2 \cdot l_1 \cdot \frac{x^3}{6} + l_1^2 \cdot \frac{x^2}{2} \right) + c_1 \cdot x \right]}{E_{\text{Stahl}} \cdot I_{\text{Profil}}}$$

$$w_{\max} = 0.13 \text{ mm}$$

Berechnung der Bolzenverbindungen auf Abscheren

$\tau_{\text{azul}} := 60 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für Bolzenverbindungen aus Stahl mit schwellonder Belastung
lt. Decker Maschinenelemente Tab. 13.1

$$\tau = \frac{F}{8 \cdot A} \quad A = \frac{d_{\text{erf}}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$d_{\text{Aerf}} := \sqrt{\frac{4F_{\text{Amax}}}{\pi \cdot 8 \tau_{\text{azul}}}}$$

$$d_{\text{Aerf}} = 15.23 \text{ mm}$$

gewählt: M24

Maximales Biegemoment ermitteln :

$$x_1 := 0 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm} \dots l_1$$

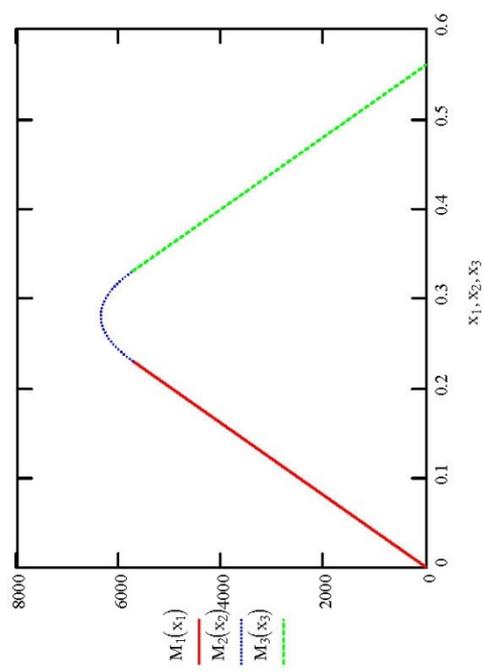
$$x_2 := l_1, l_1 + 0.5 \text{ mm} \dots l_1 + l_{\text{Kraft}}$$

$$x_3 := l_1 + l_{\text{Kraft}}, l_1 + l_{\text{Kraft}} + 0.5 \text{ mm} \dots l_{\text{quer}}$$

$$M_1(x_1) := F_A \cdot x_1$$

$$M_2(x_2) := F_A \cdot x_2 - q \cdot (x_2 - l_1) \cdot \left(\frac{x_2 - l_1}{2} \right)$$

$$M_3(x_3) := F_A \cdot x_3 - q \cdot l_{\text{Kraft}} \cdot \left(x_3 - \frac{l_{\text{quer}}}{2} \right)$$

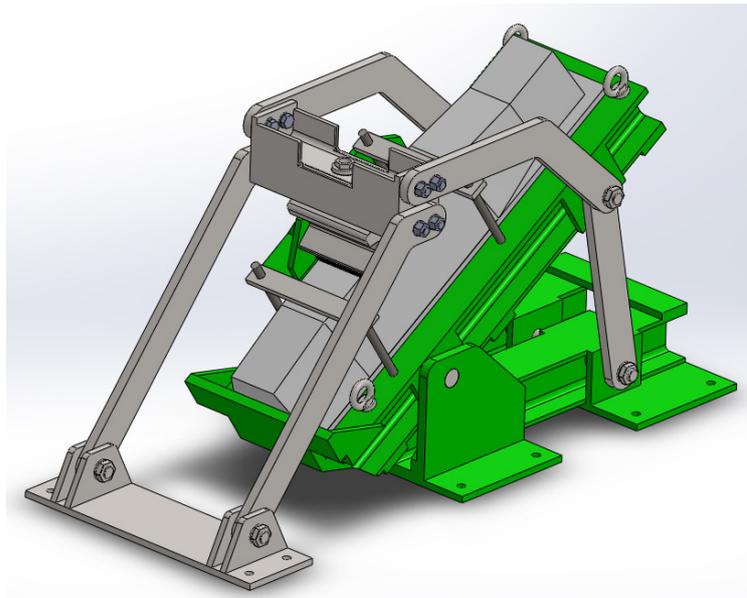


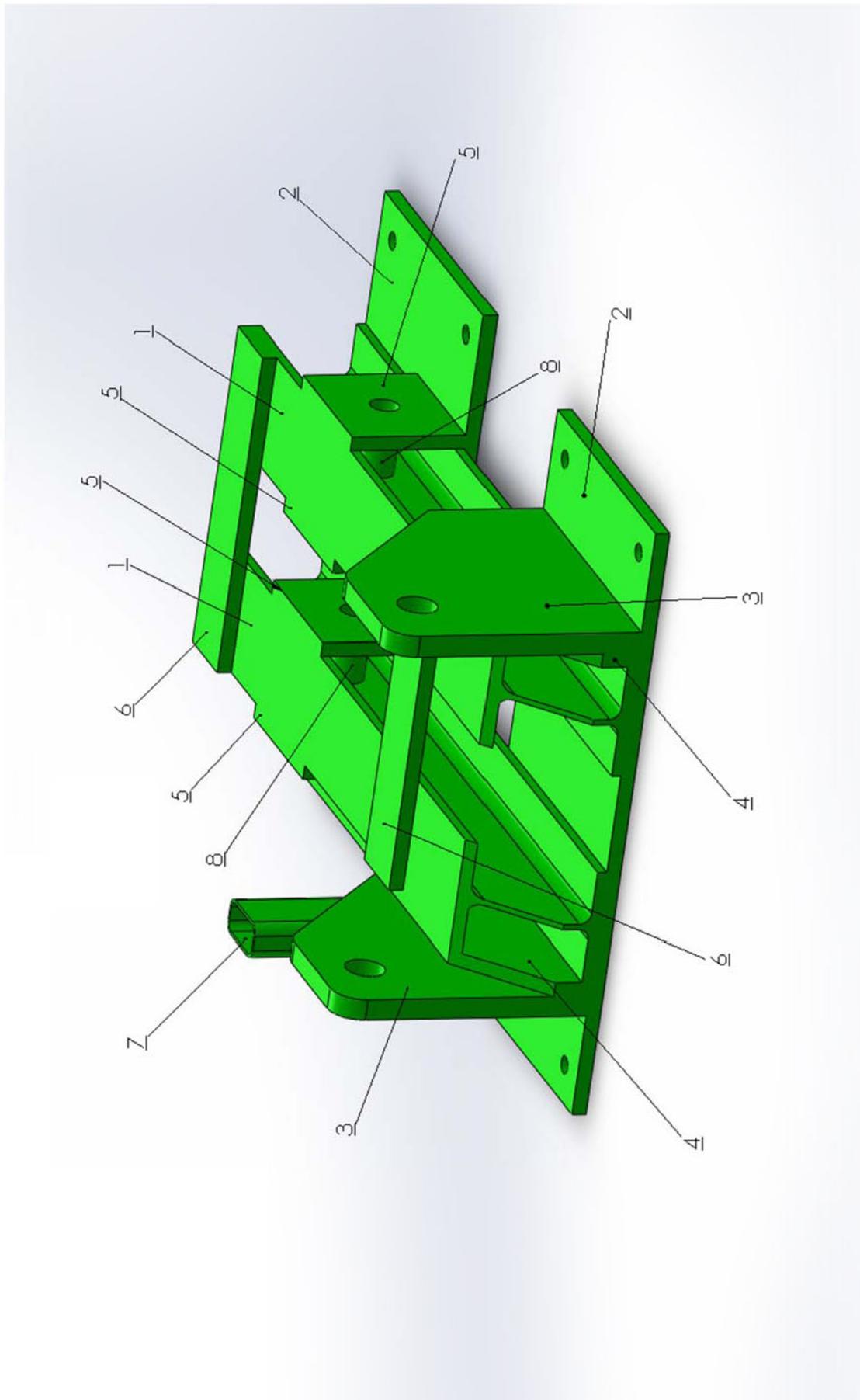
ANHANG B1 – KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN PRÜFSTAND

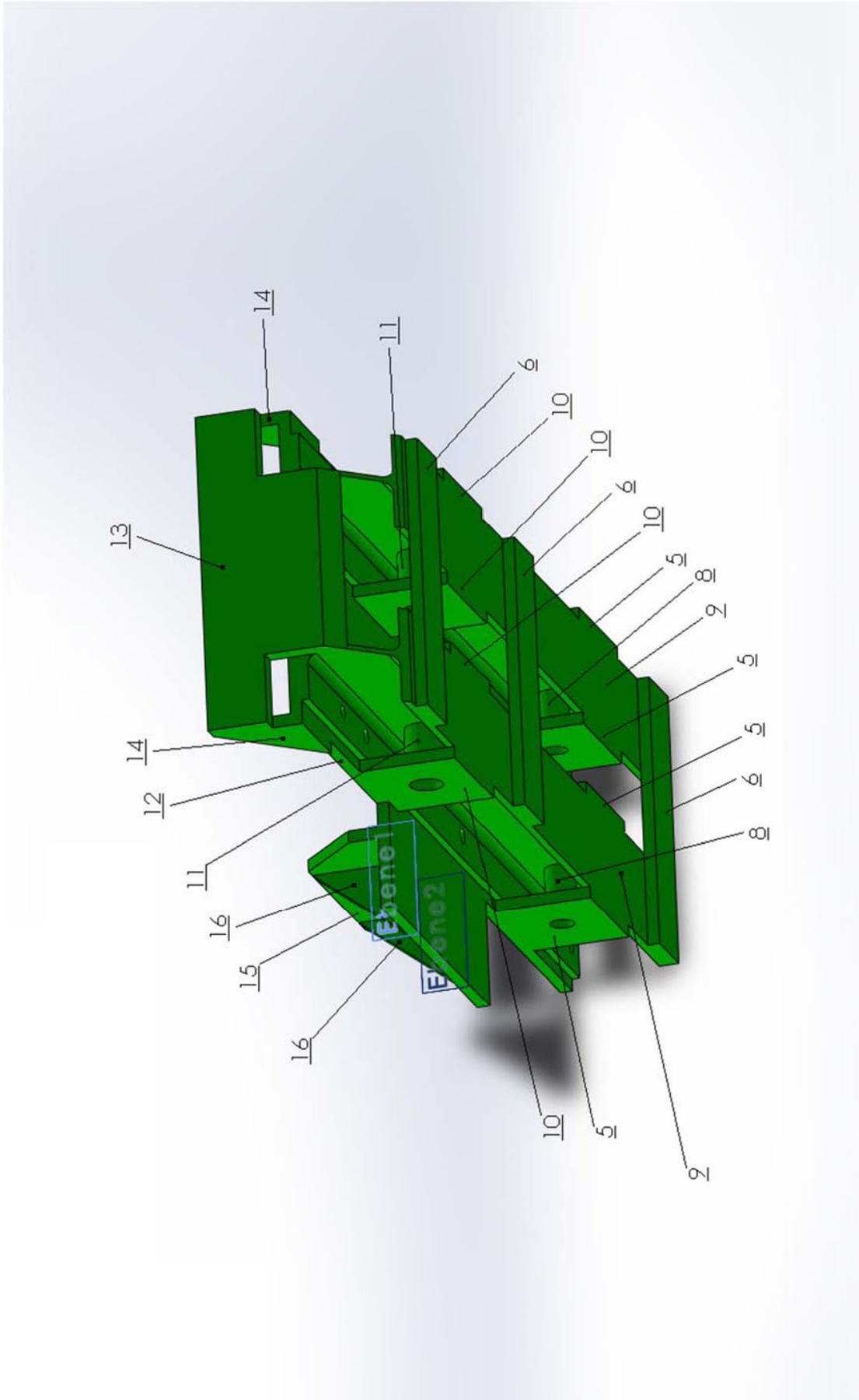
Konstruktionszeichnungen

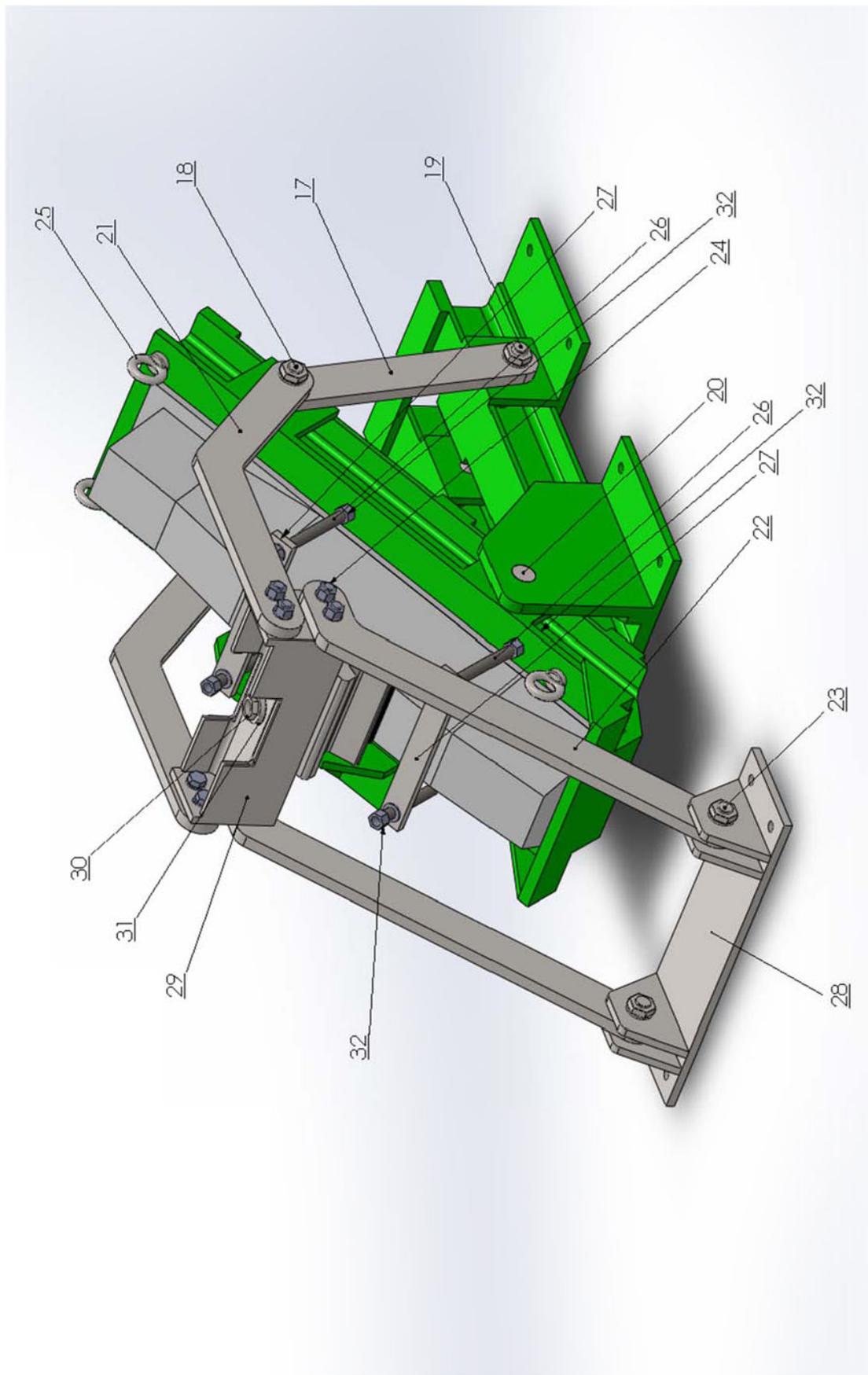
eines Prüfstandes

zur dynamischen Charakterisierung von
Schienenzwischenlagen

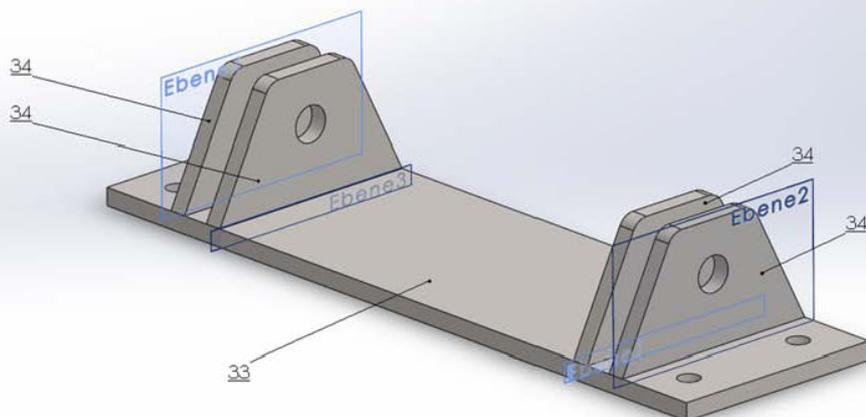




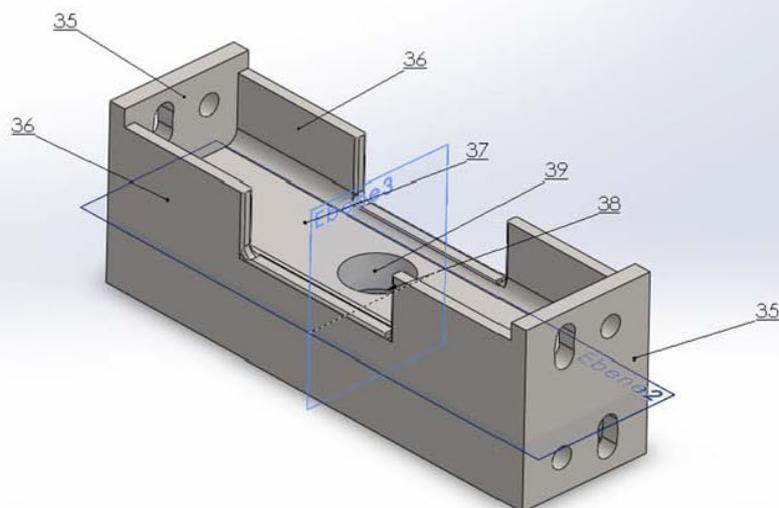


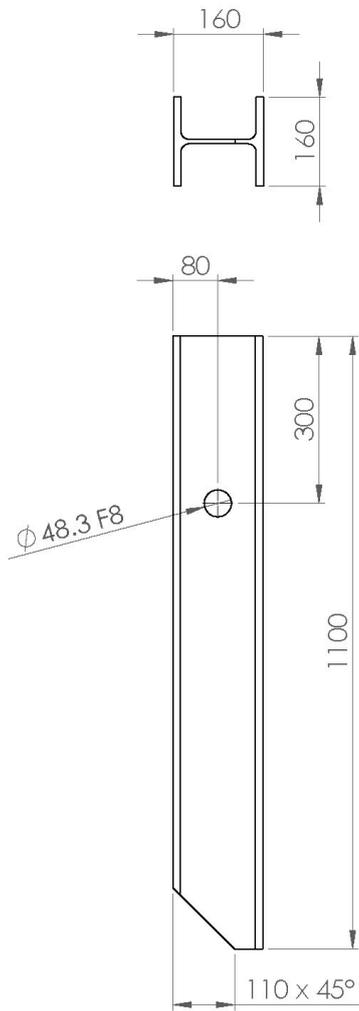


Nr. 28

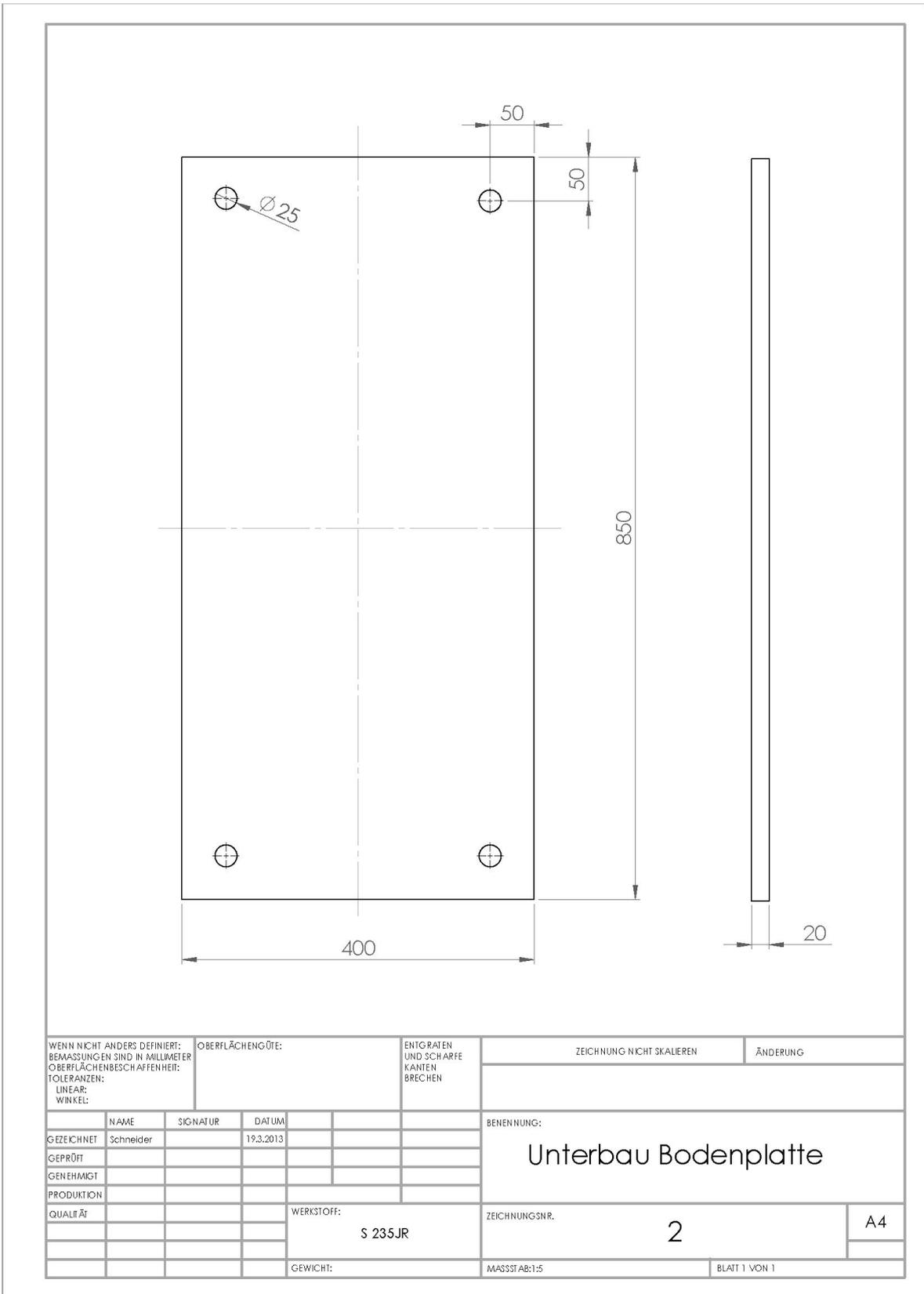


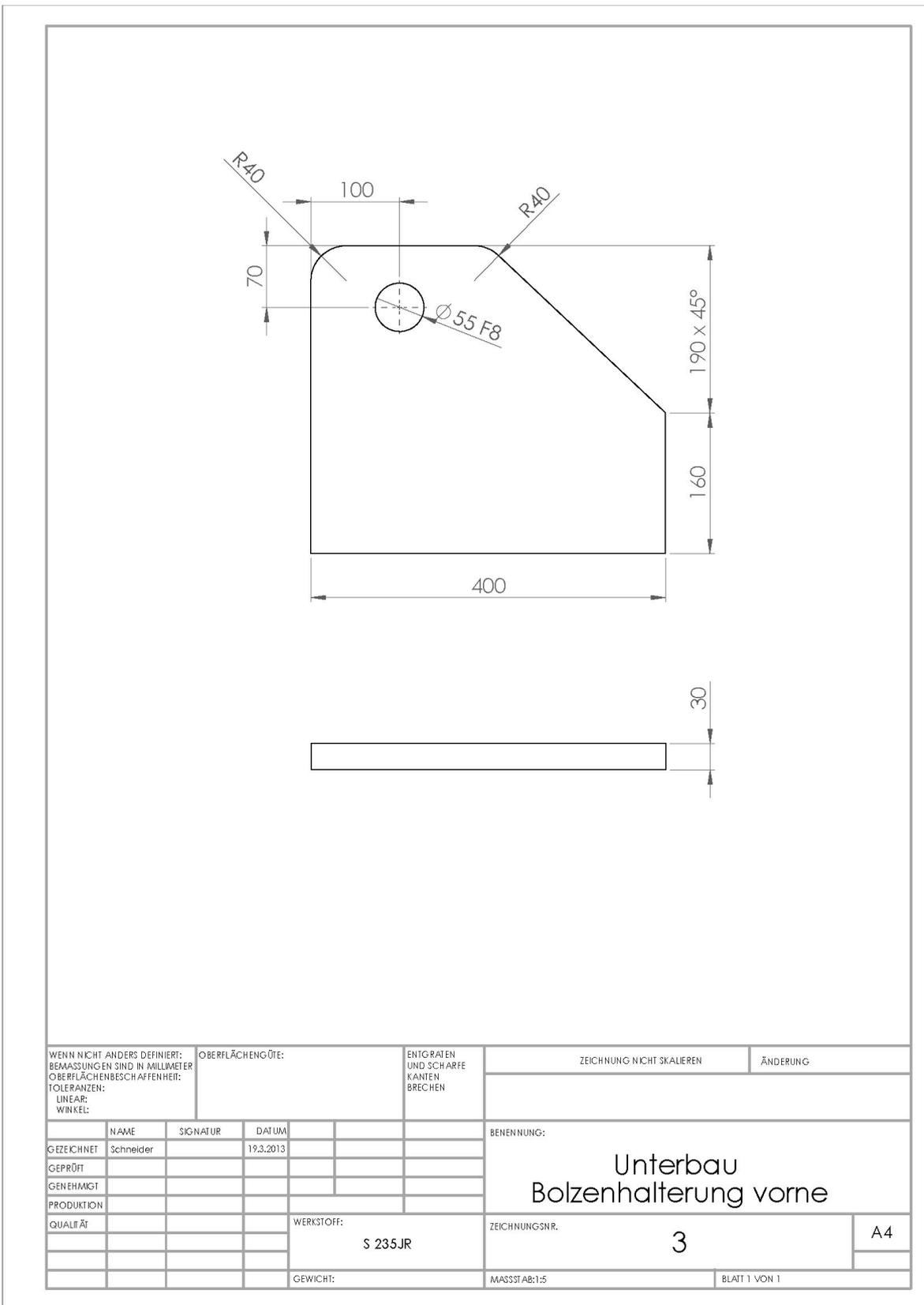
Nr. 29

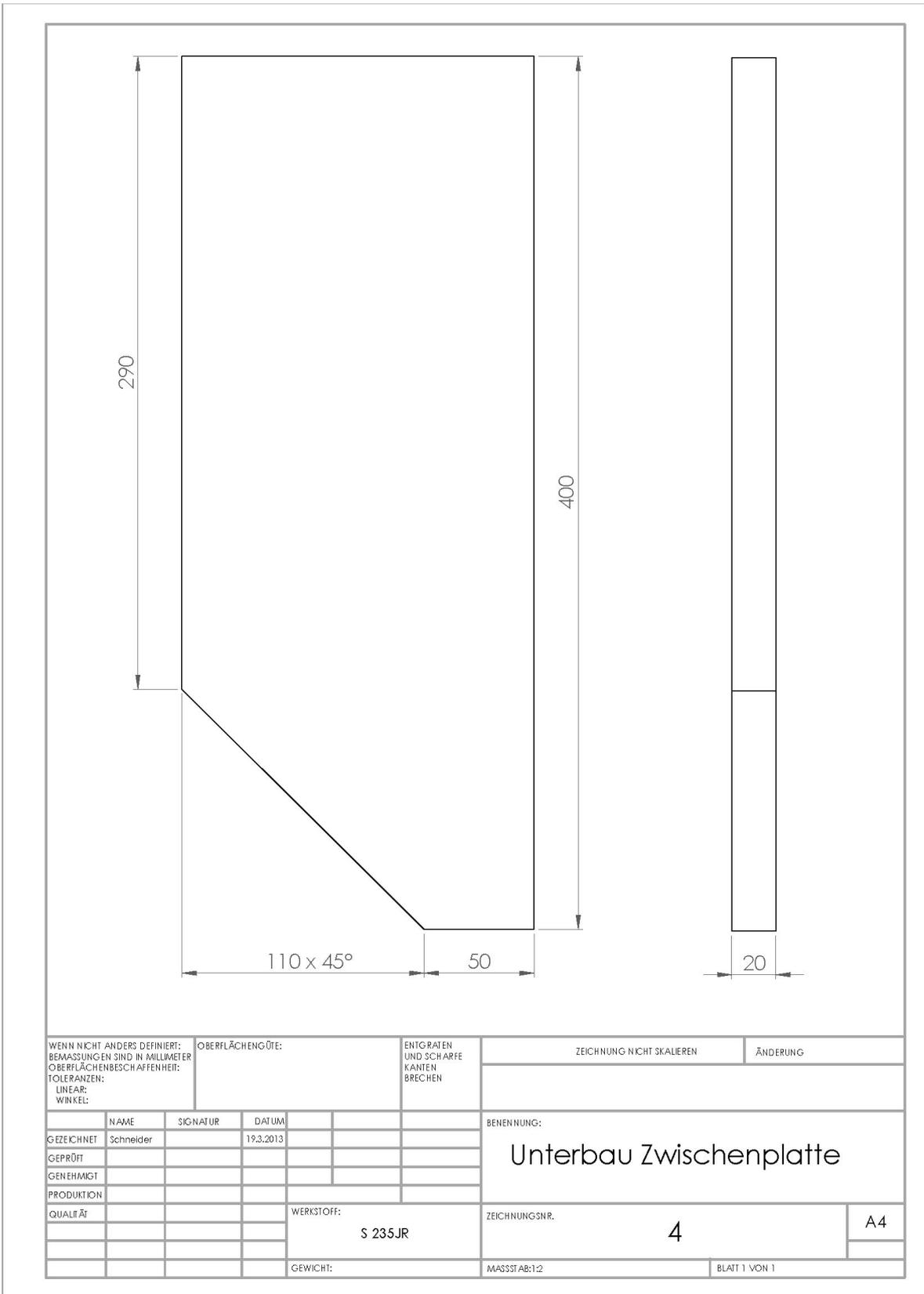




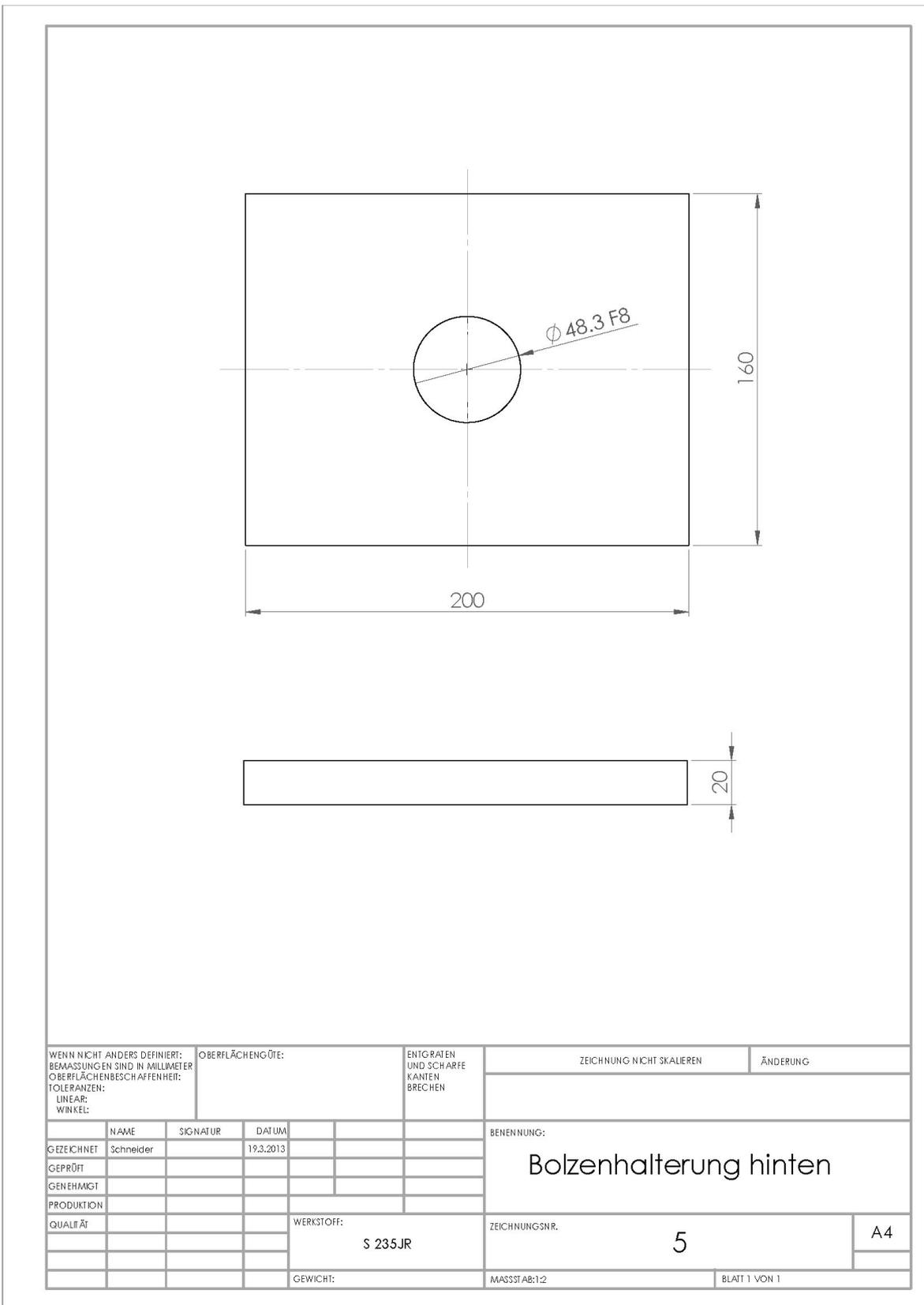
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Schneider		19.3.2013		<h1>Unterbau I-Träger</h1>			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				Breitflanschträger HE160B		1			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:10		BLATT 1 VON 1	



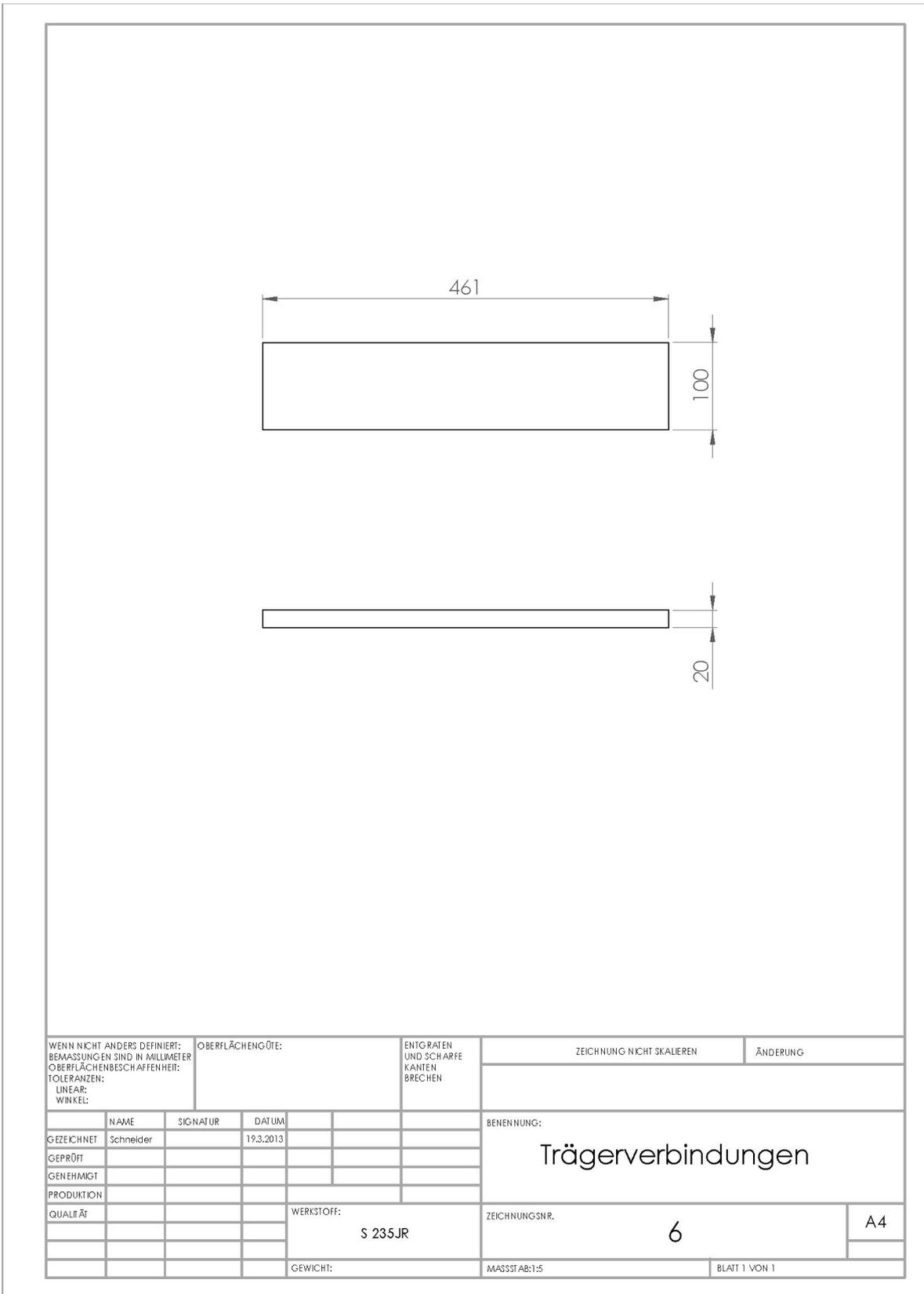




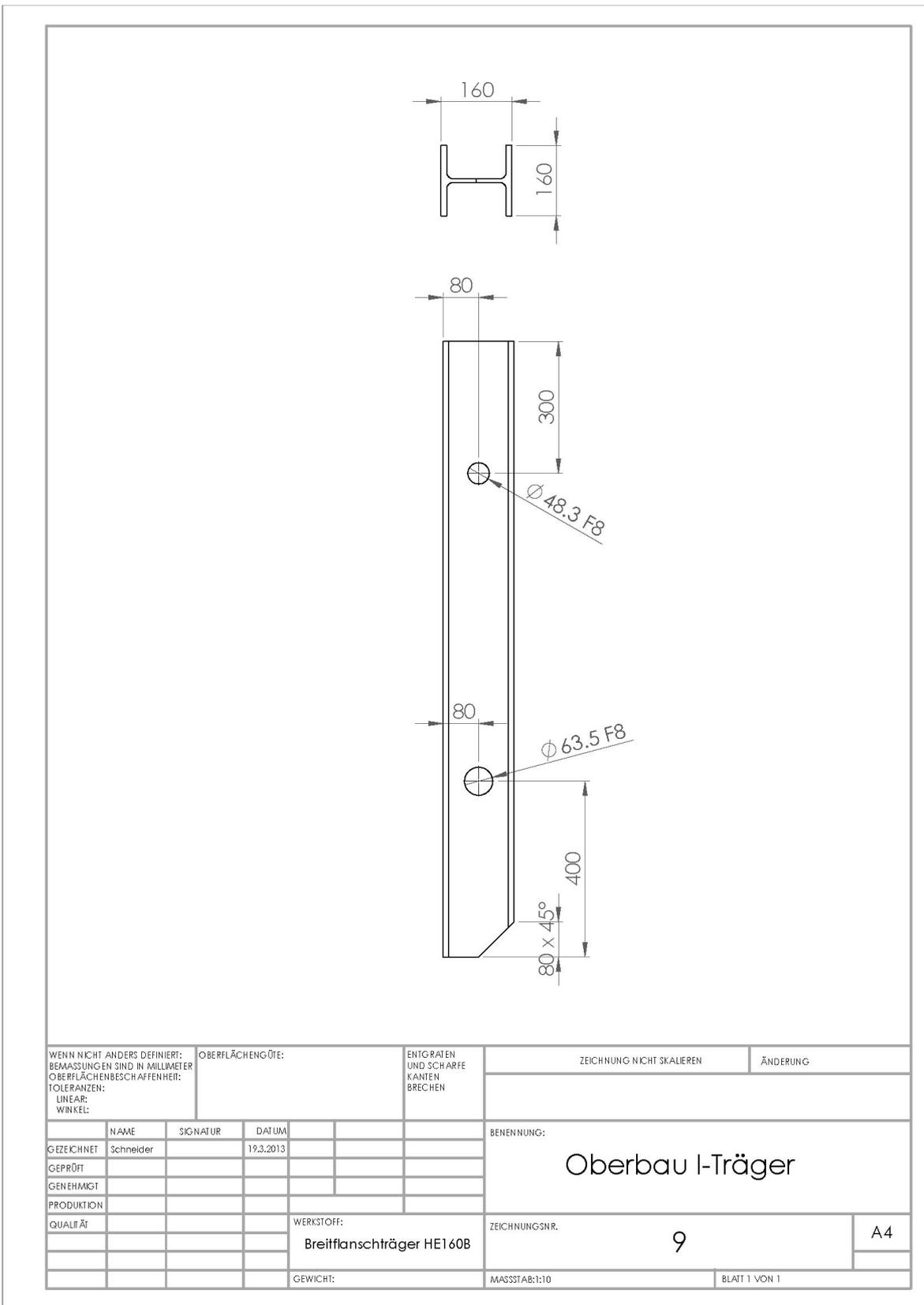
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013			Unterbau Zwischenplatte			
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				S 235JR		4			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1	

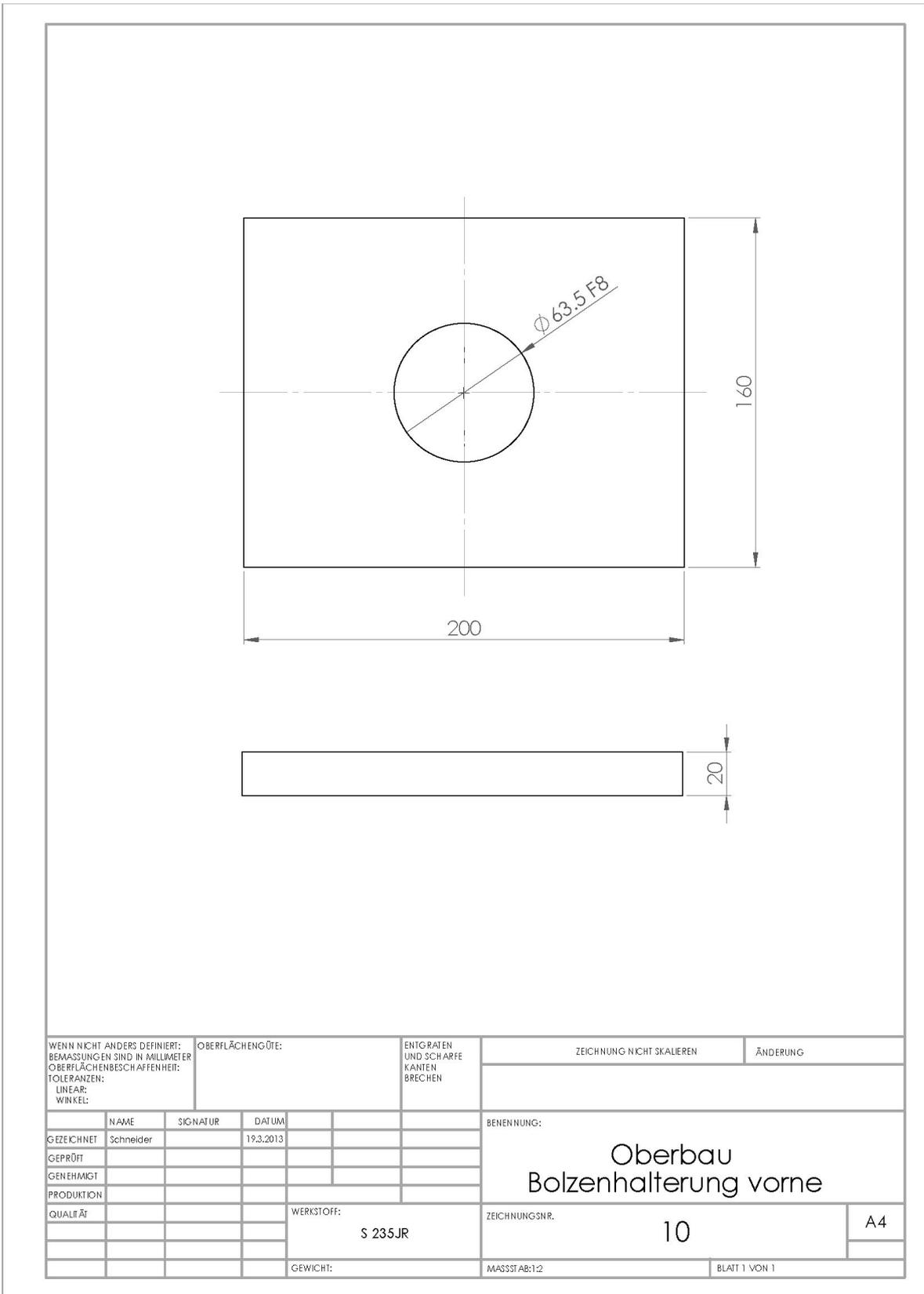


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Schneider		19.3.2013		Bolzenhalterung hinten			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT						ZEICHNUNGSNR.		5	
PRODUKTION						A4			
QUALITÄT				WERKSTOFF:		S 235JR		MASSSTAB:1:2	
				GEWICHT:				BLATT 1 VON 1	

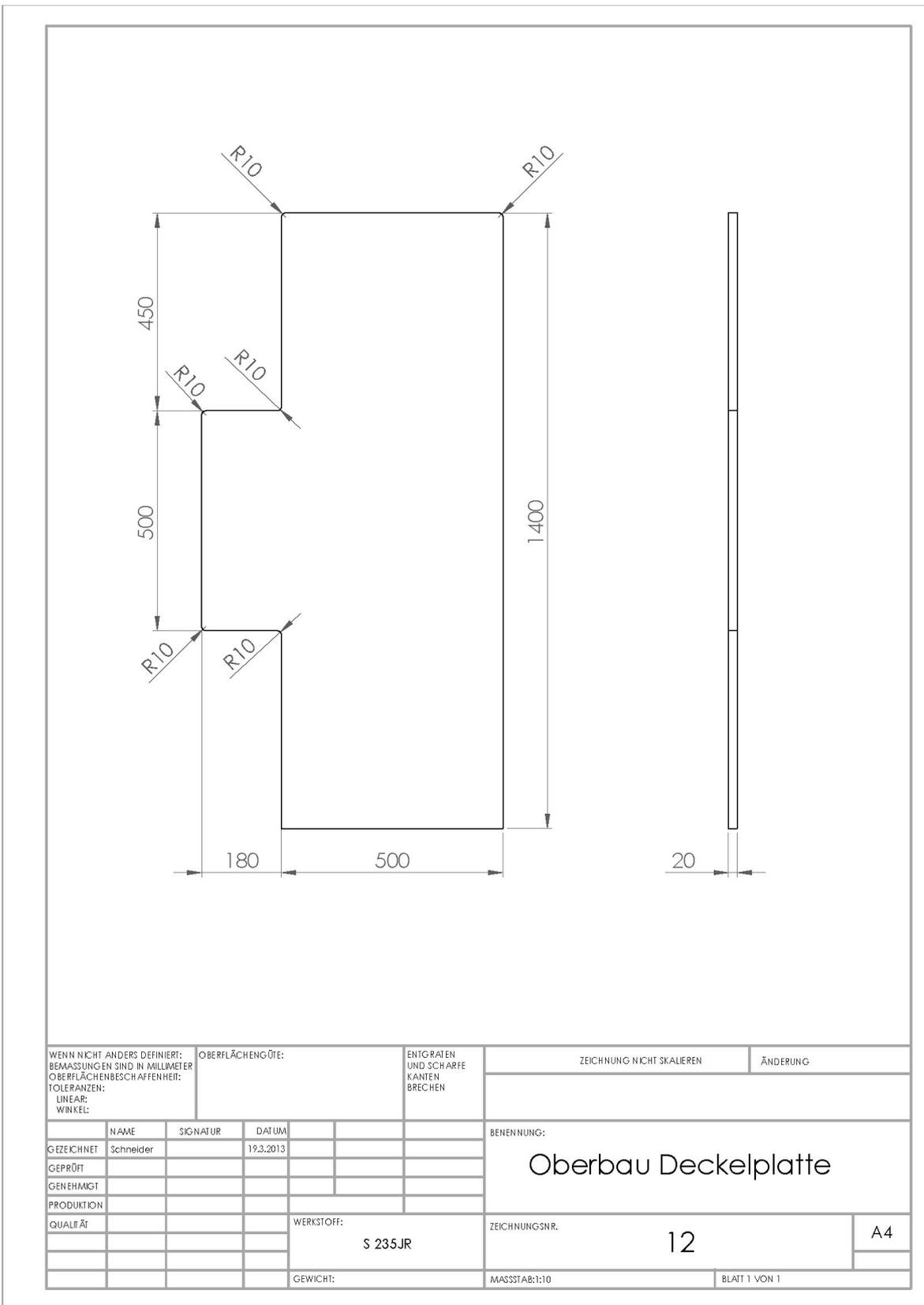


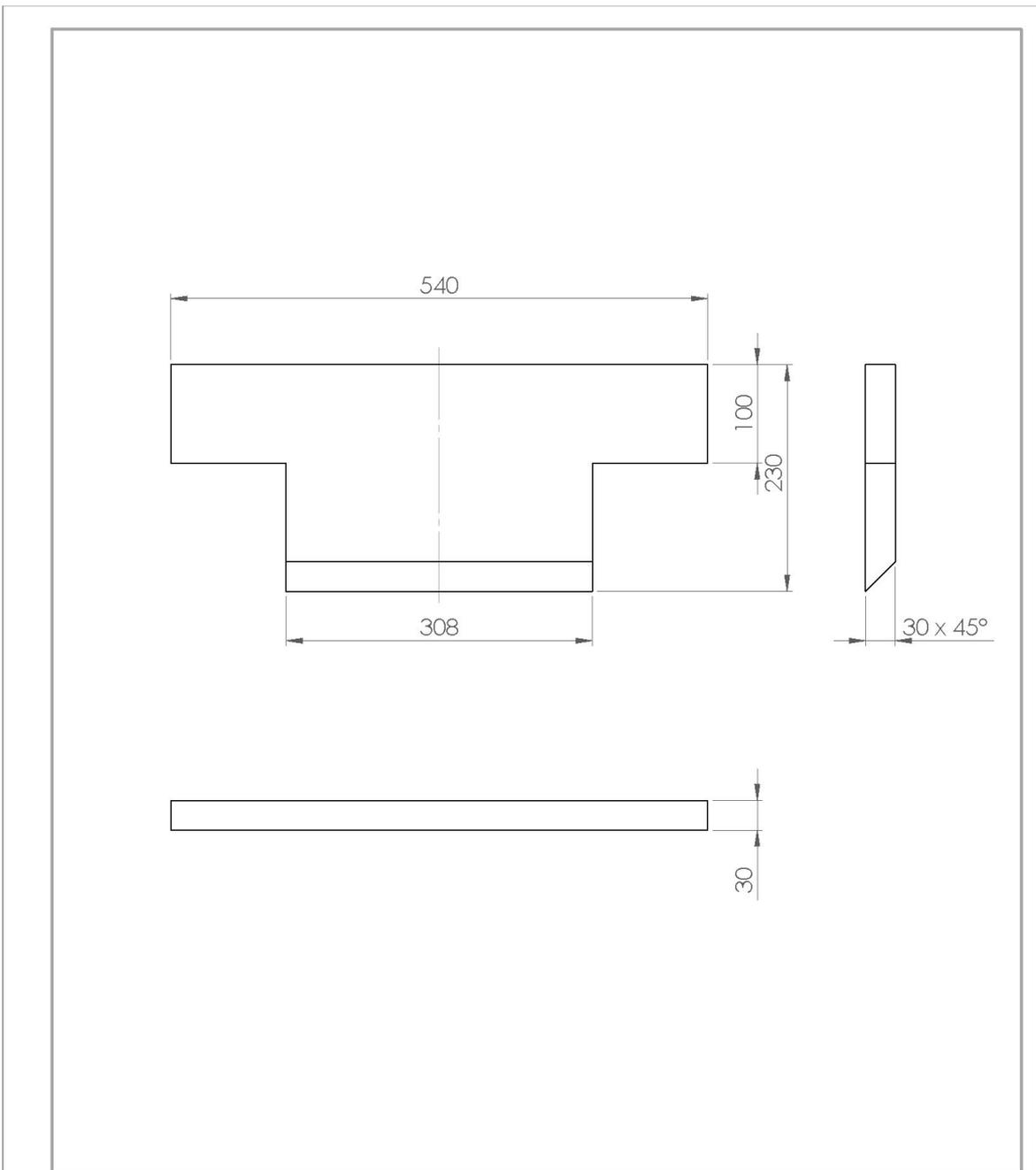
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:									
	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEZEICHNET	Schneider		19.3.2013			Trägerverbindungen			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				S 235JR		6			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	



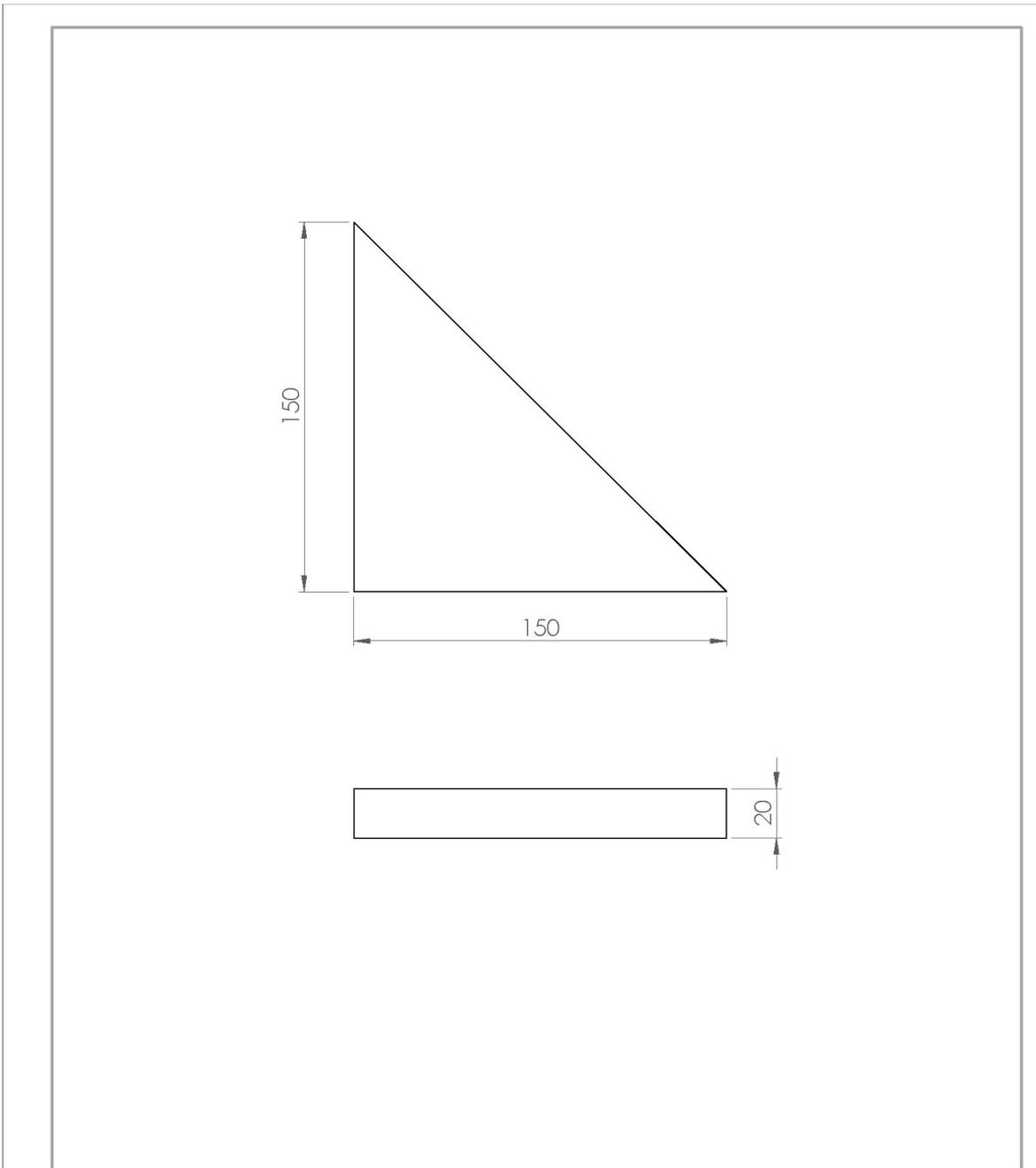


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGZEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Oberbau Bolzenhalterung vorne				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					S 235JR		10		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1

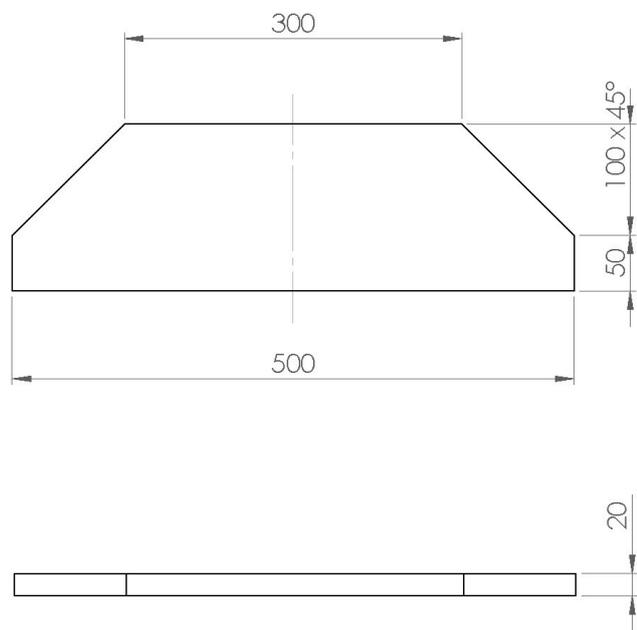




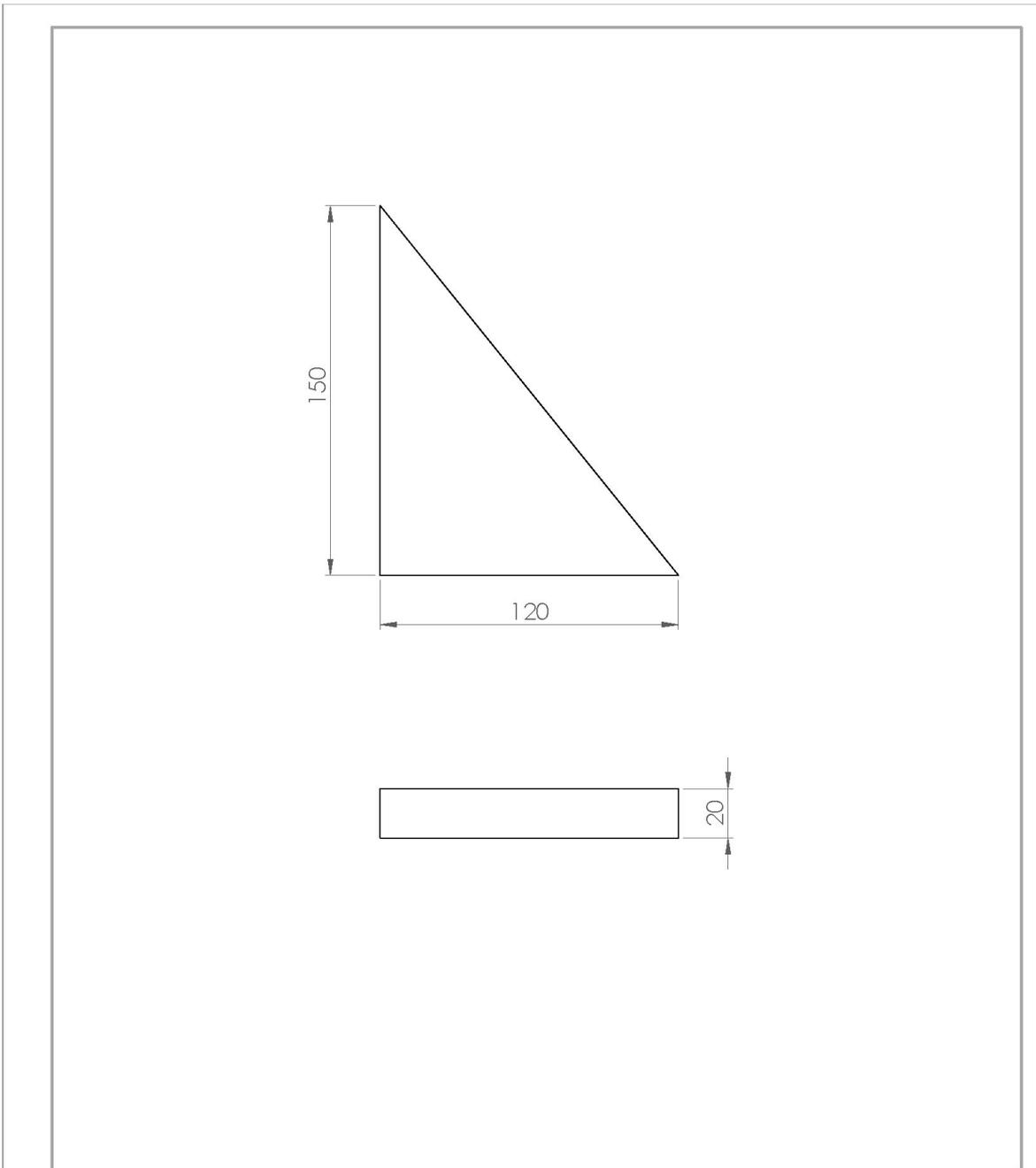
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Oberbau Anschlag vorne				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					S 235JR		13		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1



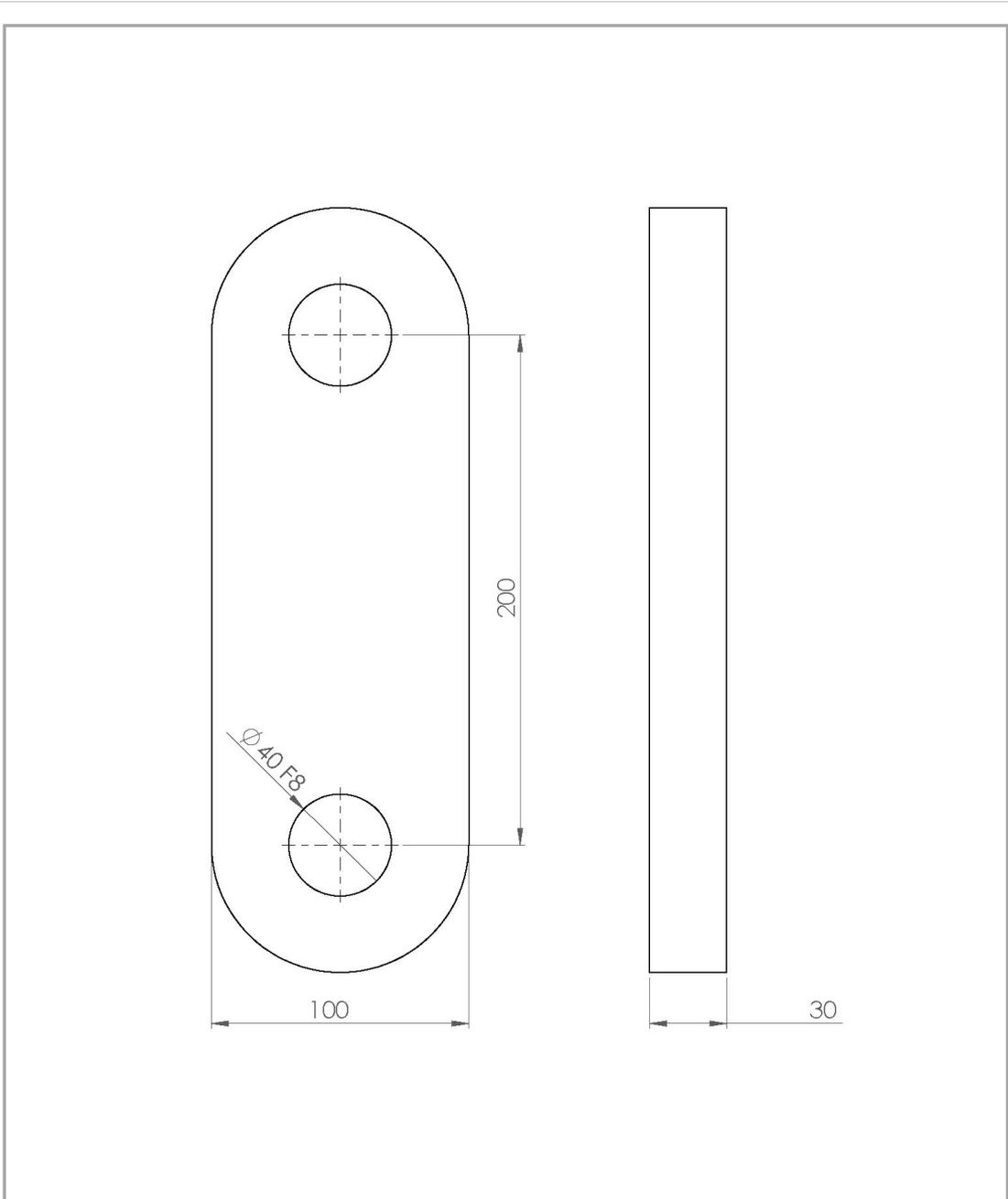
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Schneider		19.3.2013		Steg für Oberbau Anschlag vorne			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT						ZEICHNUNGSNR.		A4	
PRODUKTION						14			
QUALITÄT				WERKSTOFF:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1	
				S 235JR					
				GEWICHT:					



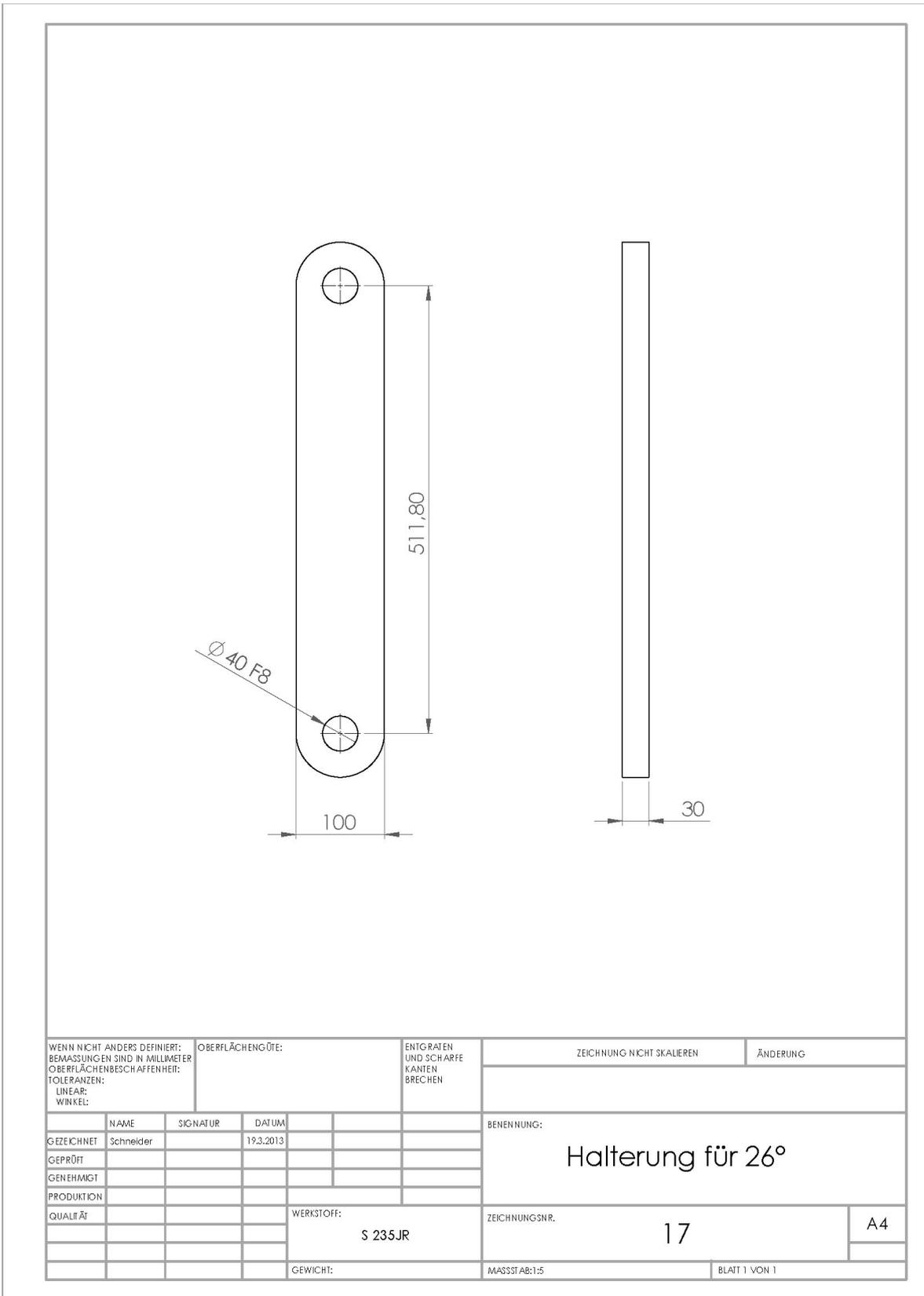
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGZEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Oberbau Anschlag seitlich				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					S 235JR		15		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1

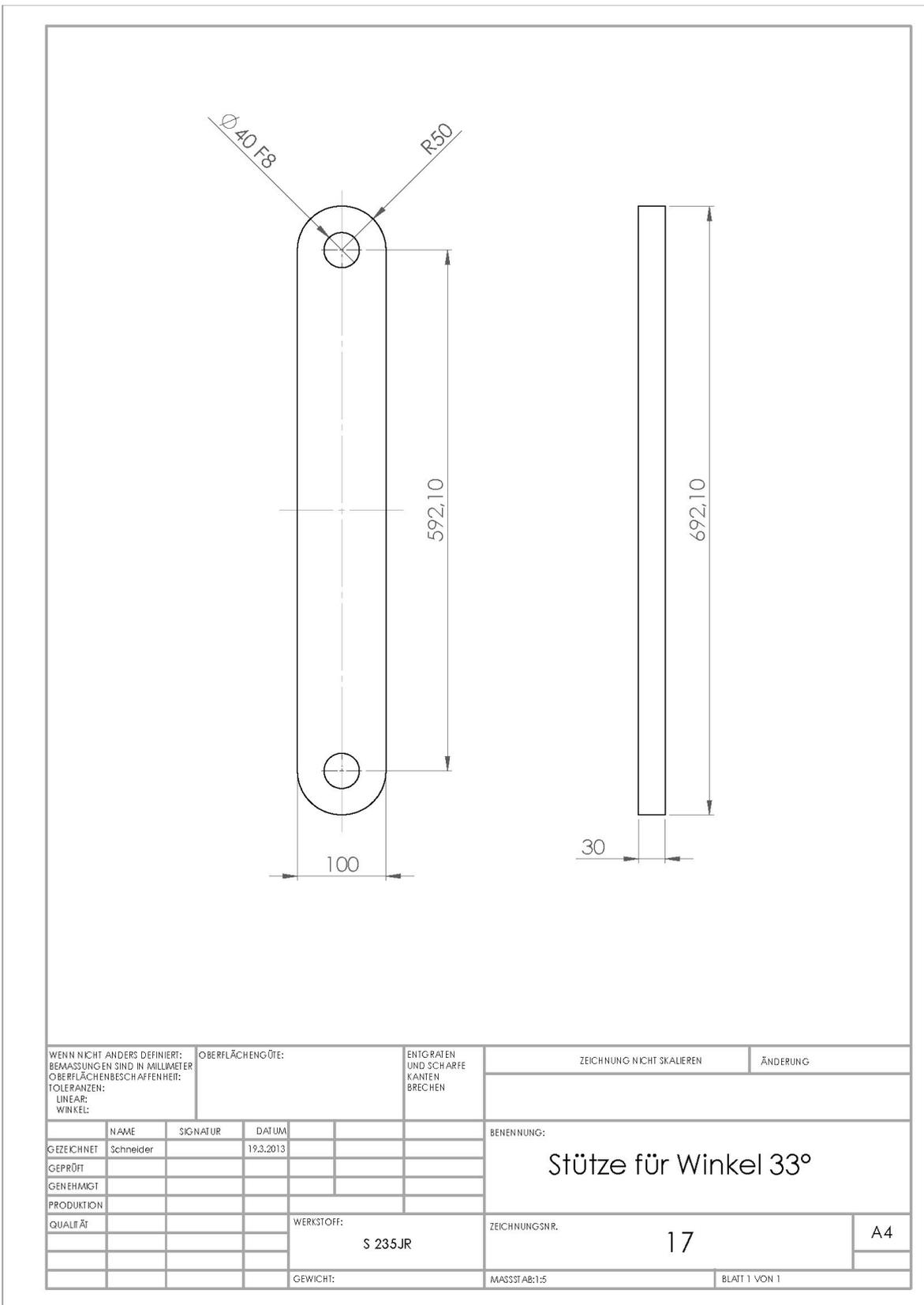


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Schneider		19.3.2013		Steg für Oberbau Anschlag seitlich			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				S 235JR		16			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1	

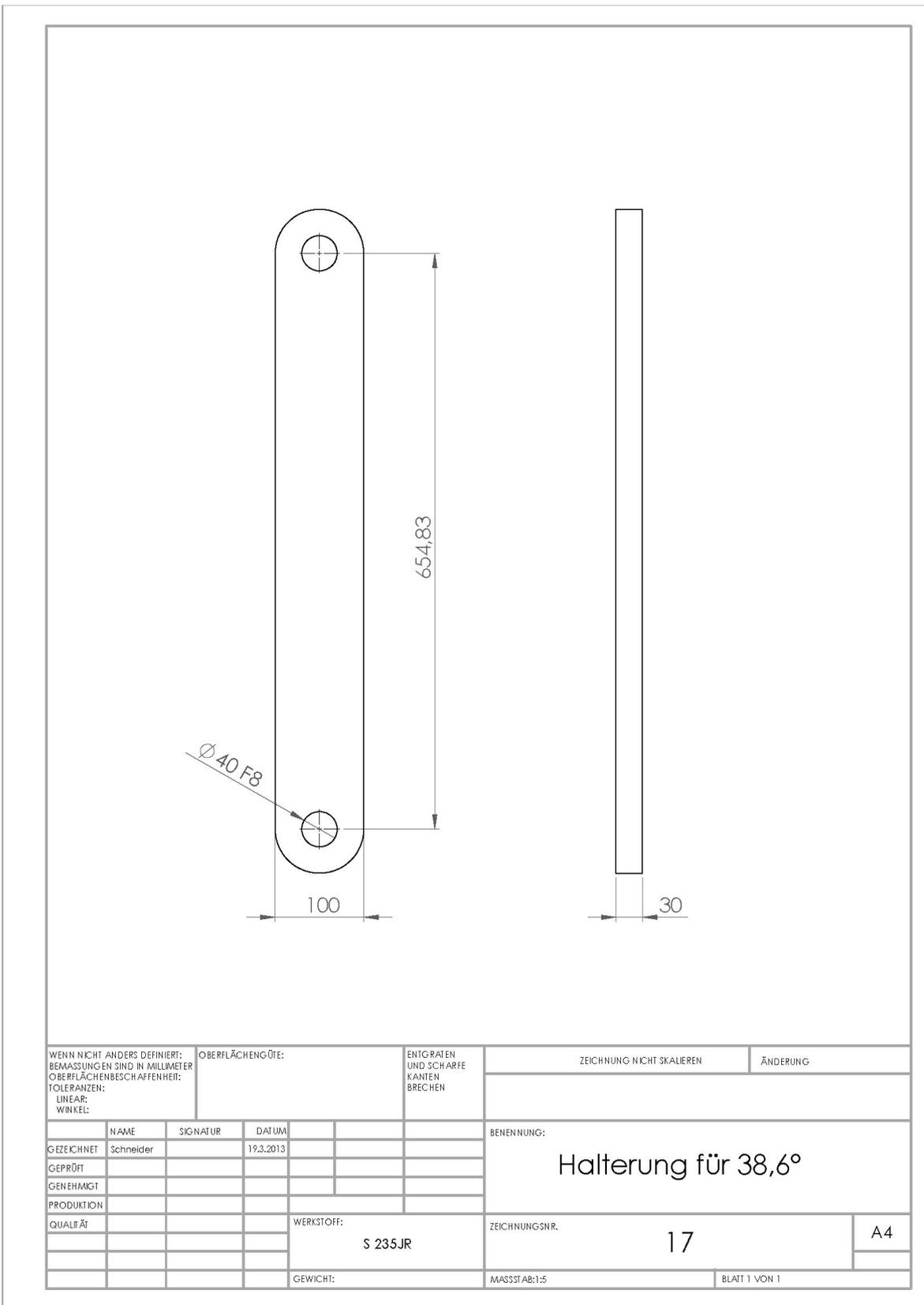


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013			Halterung für 0°			
GENEHMIGT									
PRODUKTION						ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				WERKSTOFF:		17			
				S 235JR		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1	
				GEWICHT:					

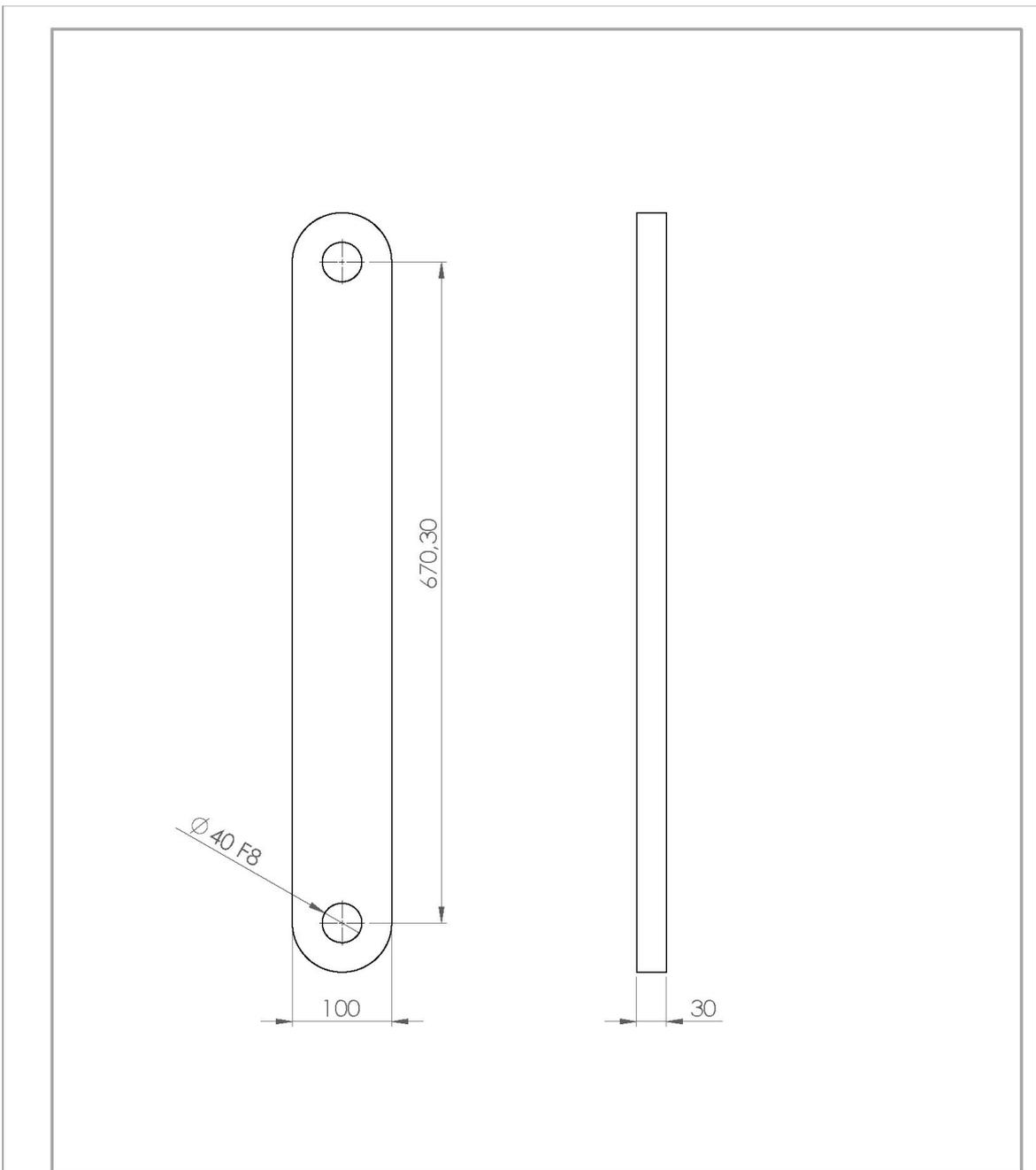




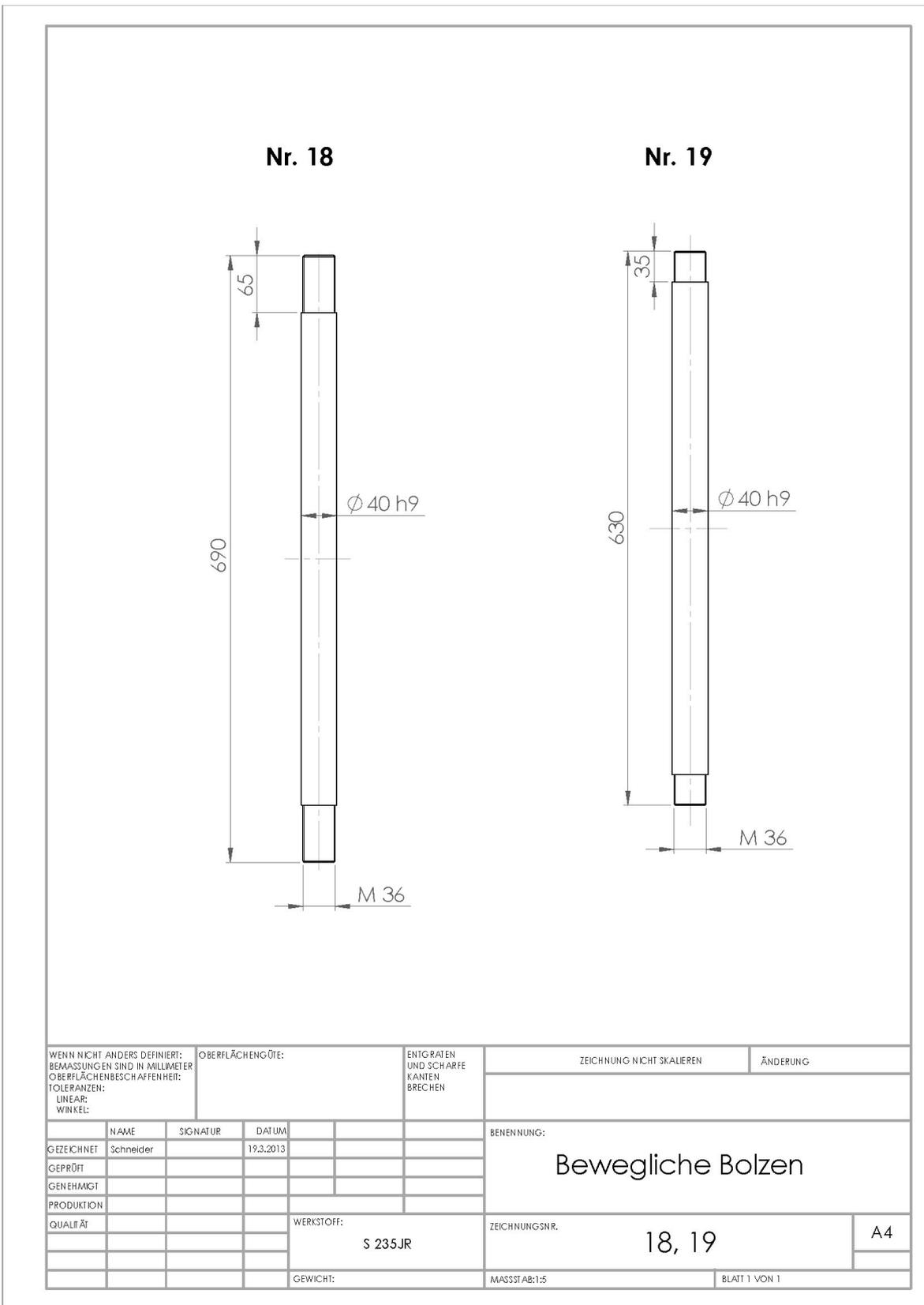
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013			Stütze für Winkel 33°			
GENEHMIGT									
PRODUKTION						ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				WERKSTOFF:		17			
				S 235JR		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	
				GEWICHT:					



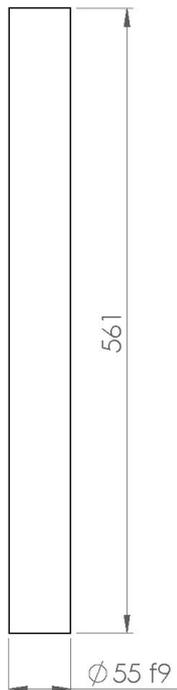
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013			Halterung für 38,6°			
GENEHMIGT									
PRODUKTION						ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				WERKSTOFF:		17			
				S 235JR		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	
				GEWICHT:					



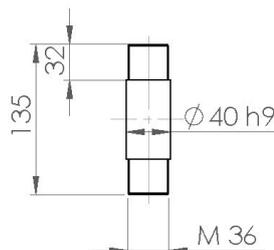
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:				OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME Schneider				SIGNATUR		DATUM 19.3.2013		BENENNUNG: <h2 style="text-align: center;">Halterung für 40°</h2>			
GEZEICHNET				GEPRÜFT		GENEHMIGT		ZEICHNUNGSNR. <h1 style="text-align: center;">17</h1>			
PRODUKTION				QUALITÄT		WERKSTOFF: S 235JR		MASSSTAB:1:5		A4 BLATT 1 VON 1	
GEWICHT:											



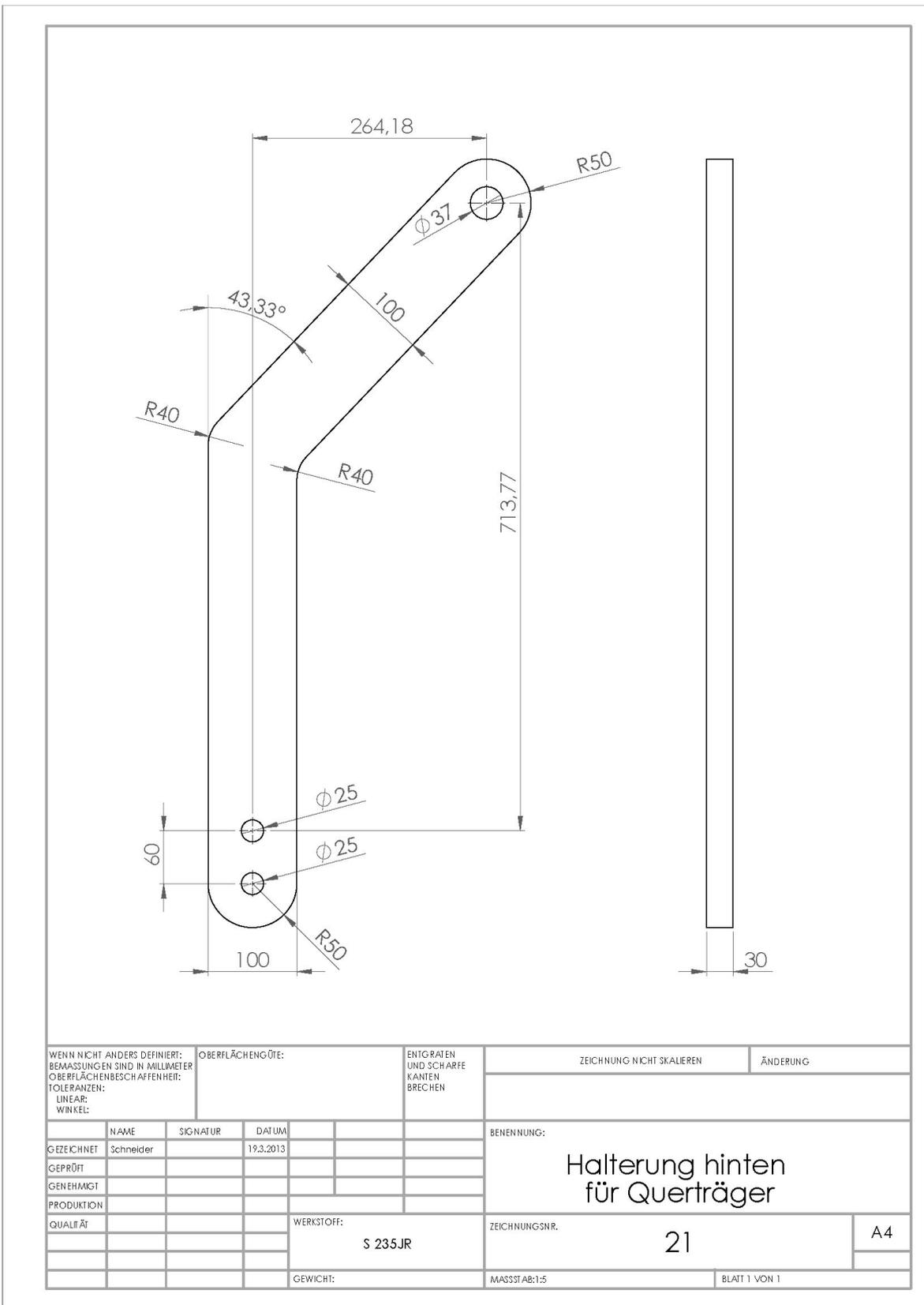
Nr. 20



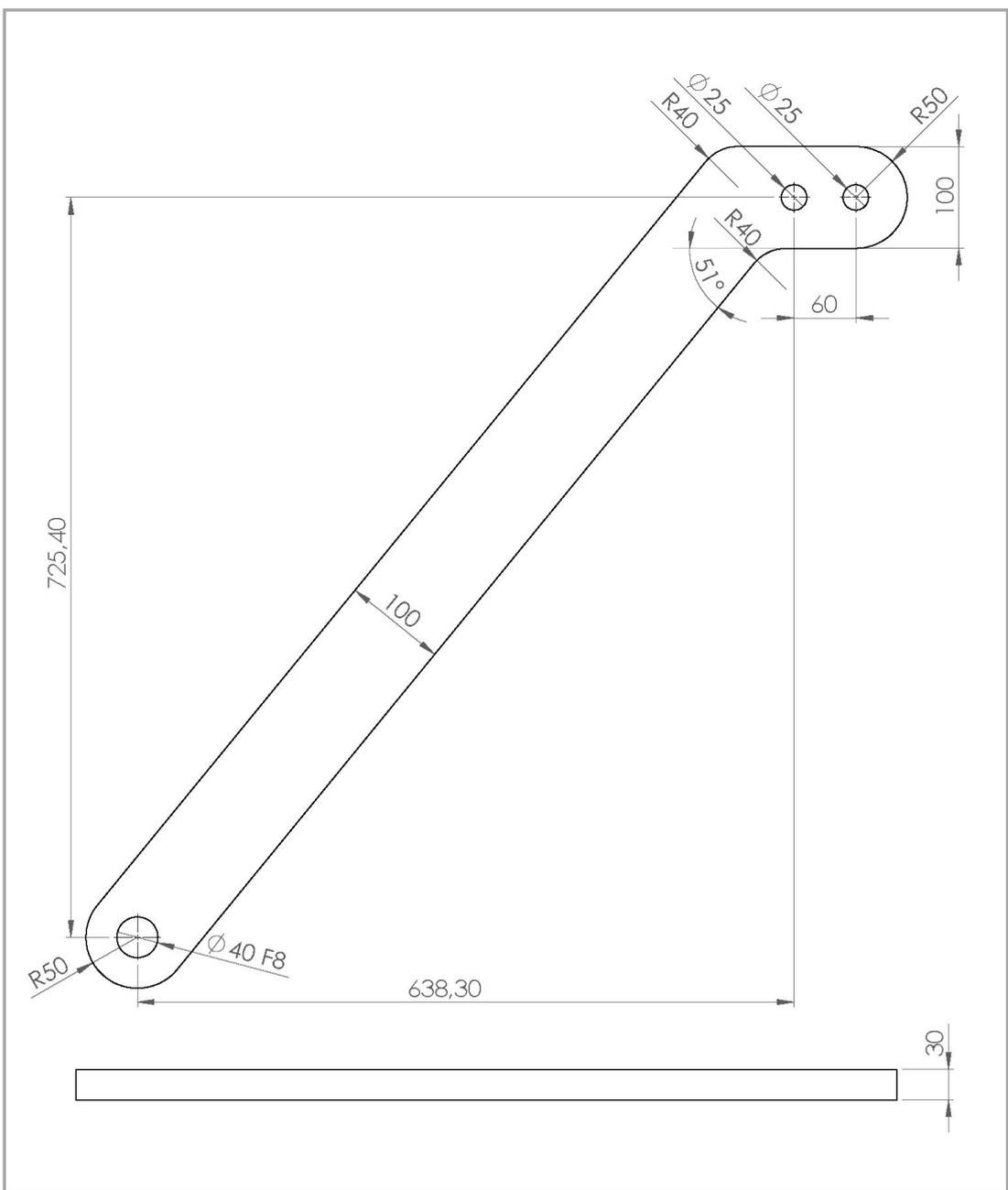
Nr. 23



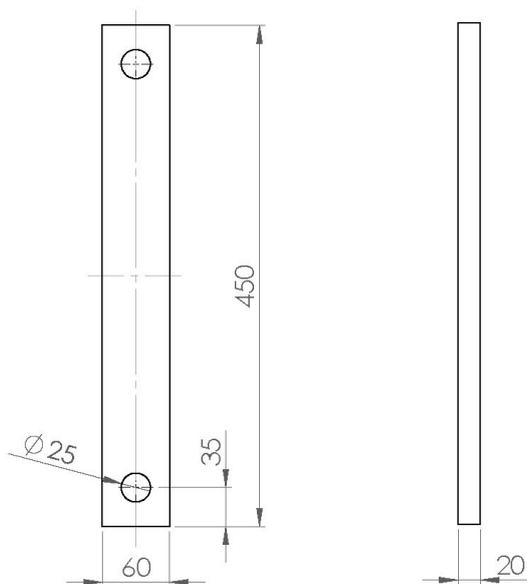
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:									
	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEZEICHNET	Schneider		19.3.2013			Bolzen			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				S 235JR		20, 23			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	



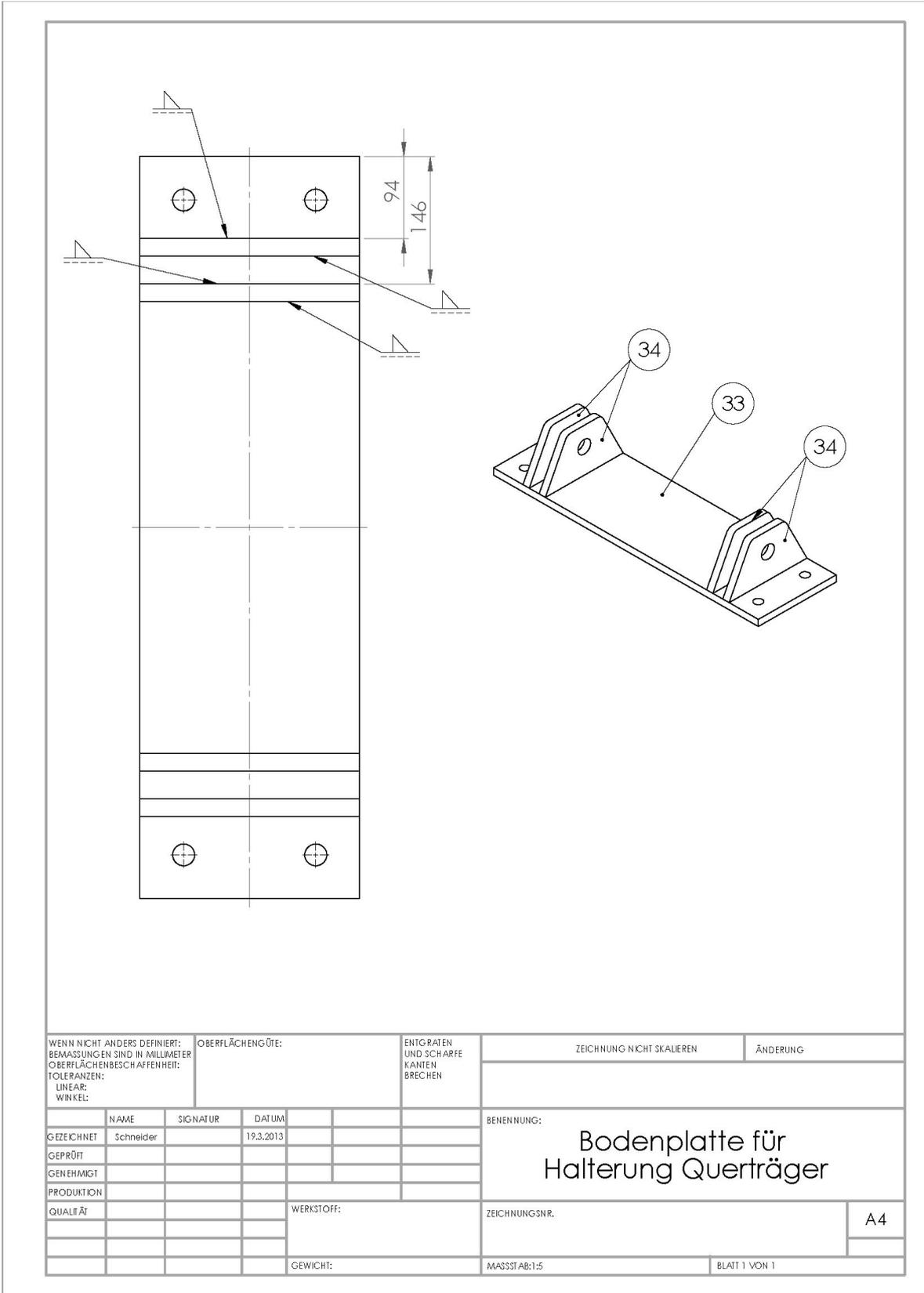
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:					
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013	Halterung hinten für Querträger					
GENEHMIGT									
PRODUKTION				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				S 235JR		21			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	

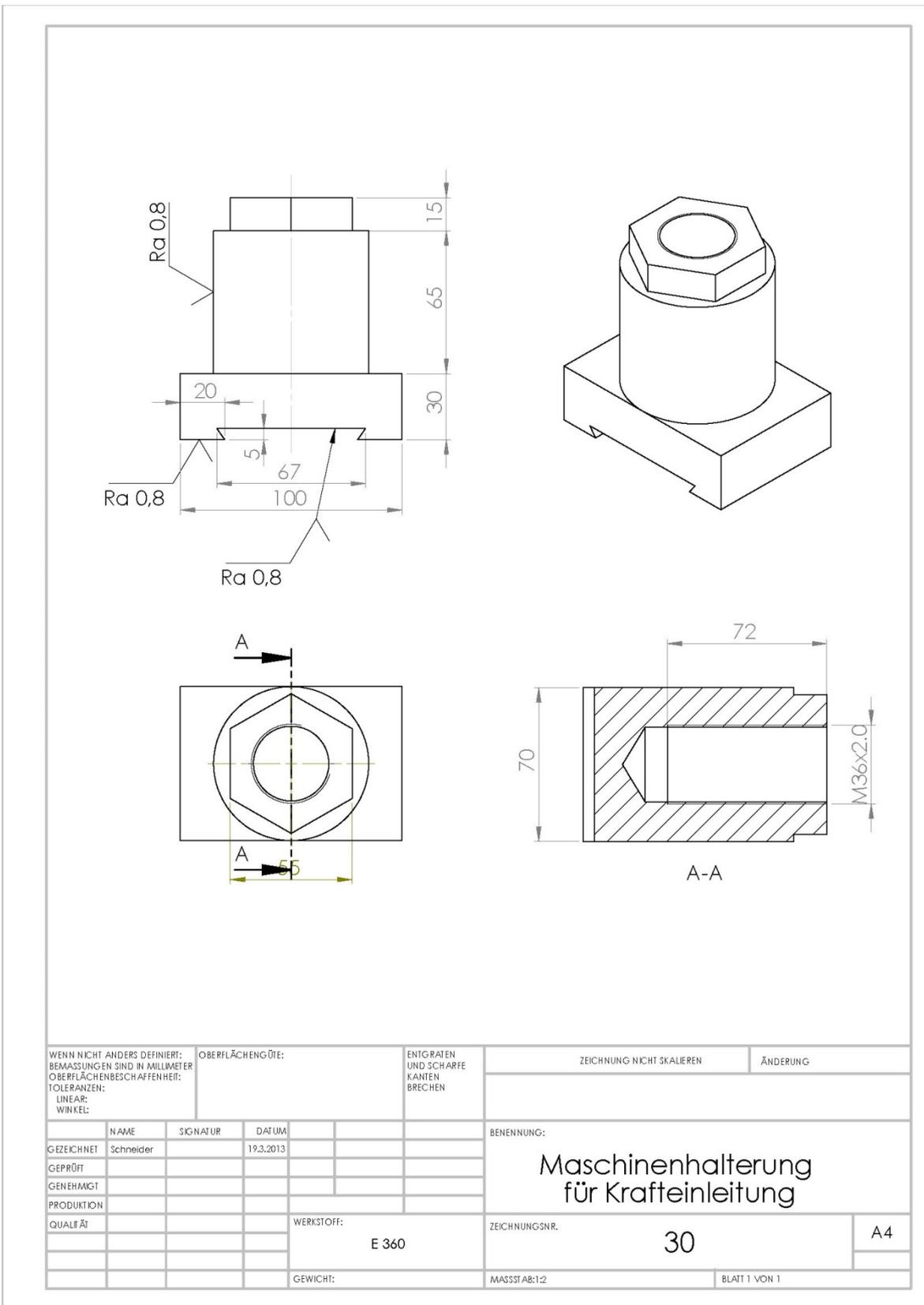


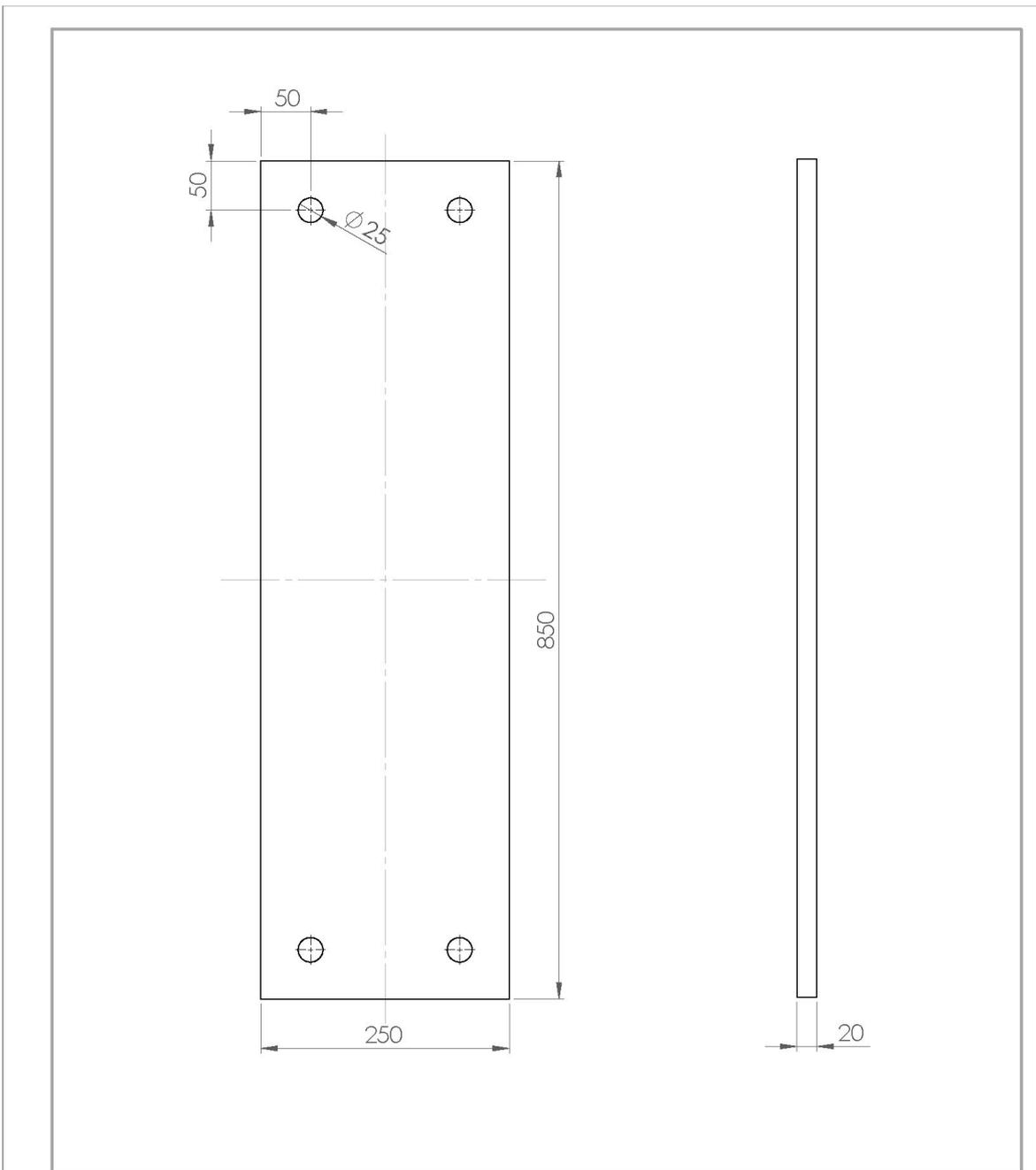
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013			Halterung vorne für Querträger			
GENEHMIGT									
PRODUKTION						ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				WERKSTOFF:		22			
				S 235JR		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	
				GEWICHT:					



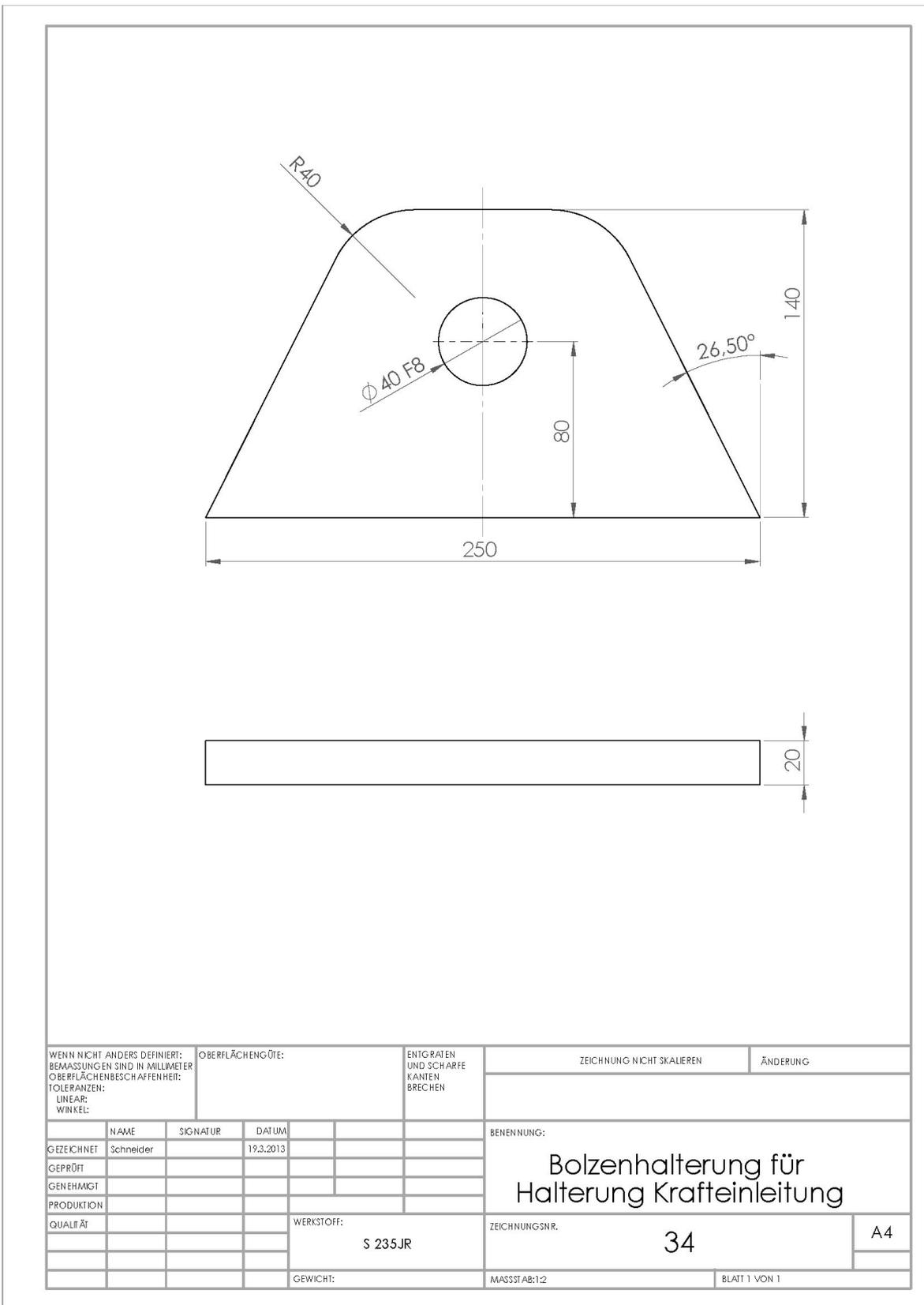
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGZEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Halterung für Schwelle				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					S 235JR		27		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1



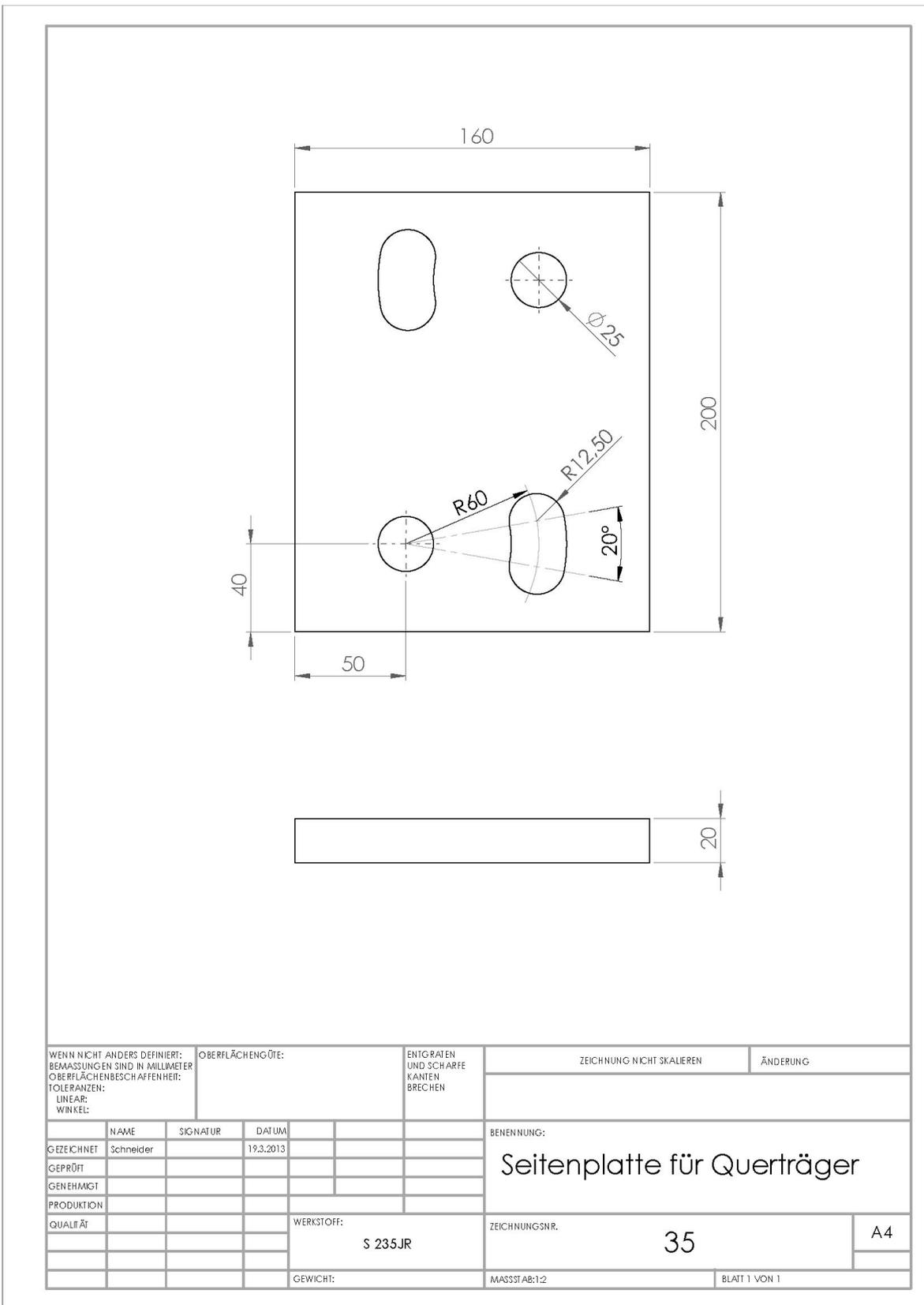


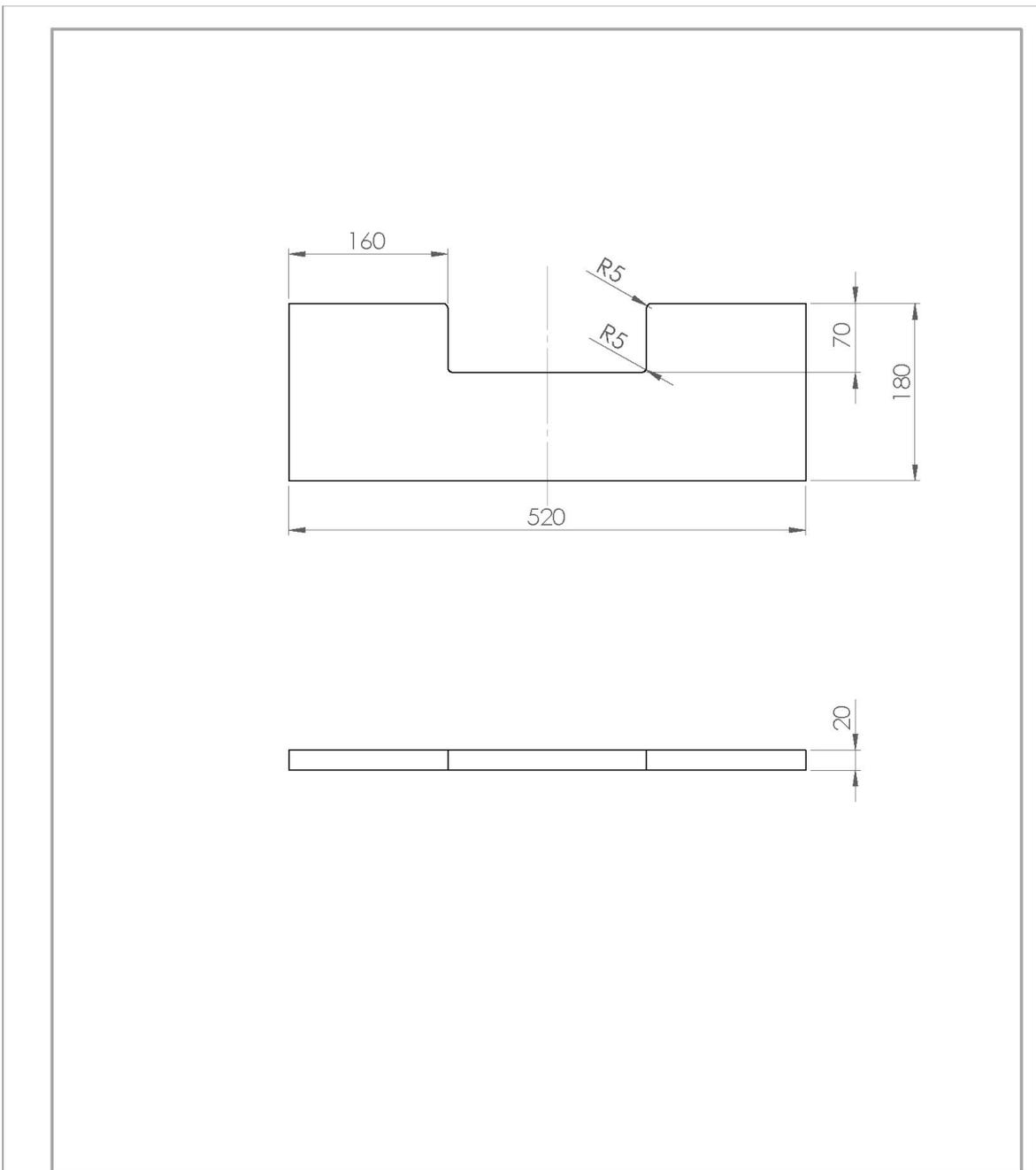


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG		
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:				
	Schneider		19.3.2013			Bodenplatte für Halterung Krafteinleitung				
GEPRÜFT										
GENEHMIGT						ZEICHNUNGSNR.		A4		
PRODUKTION						33				
QUALITÄT					WERKSTOFF:					
					S 235JR		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	
					GEWICHT:					

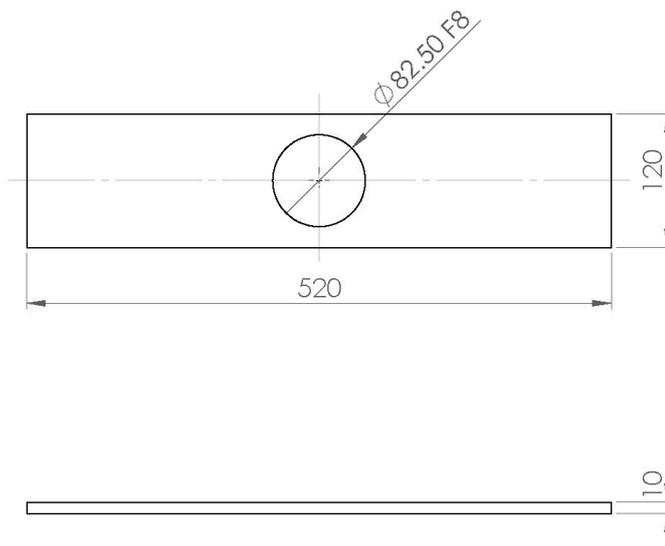


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM			BENENNUNG:			
GEPRÜFT	Schneider		19.3.2013			Bolzenhalterung für Halterung Kraffteinleitung			
GENEHMIGT									
PRODUKTION				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
QUALITÄT				S 235JR		34			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1	

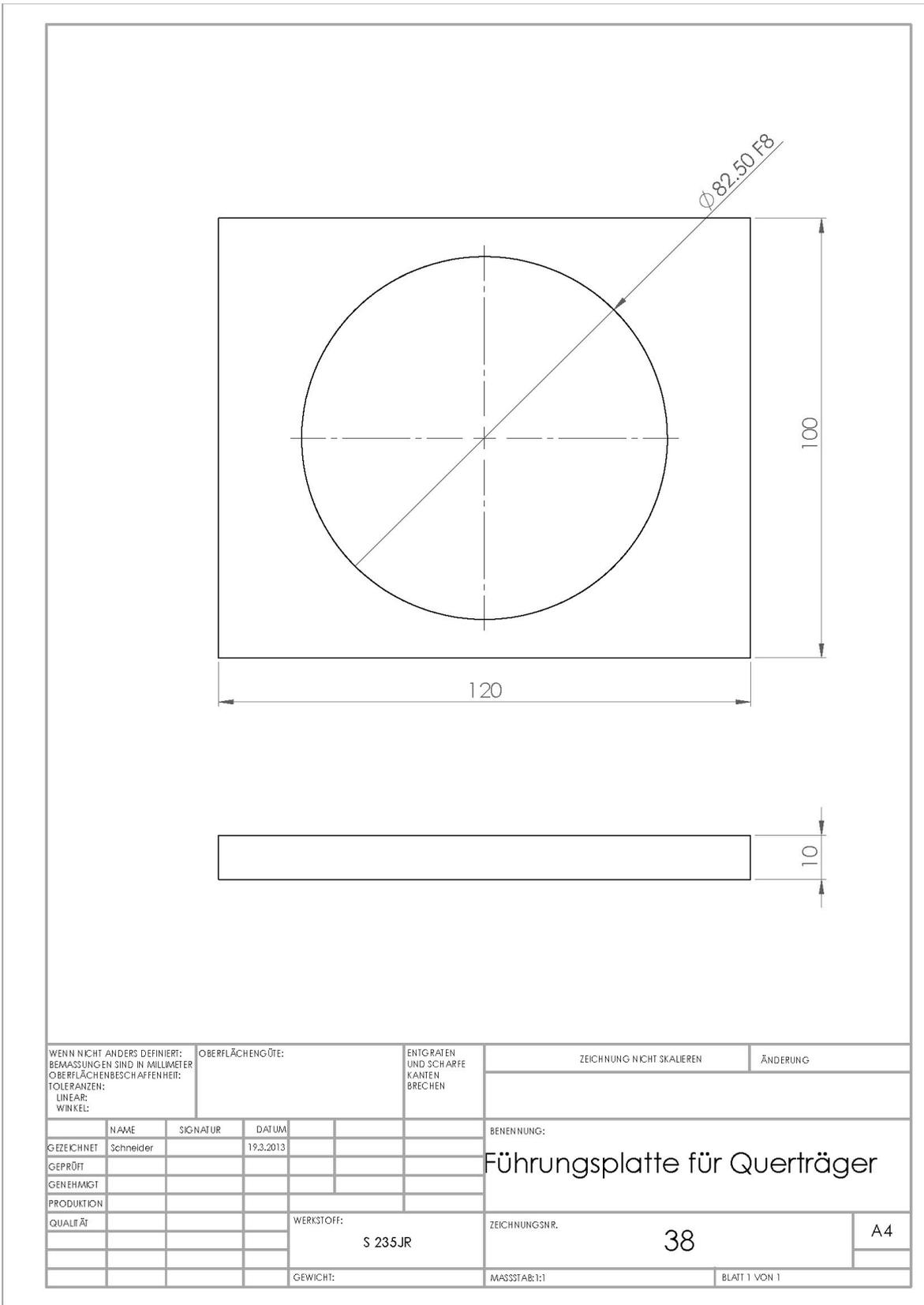


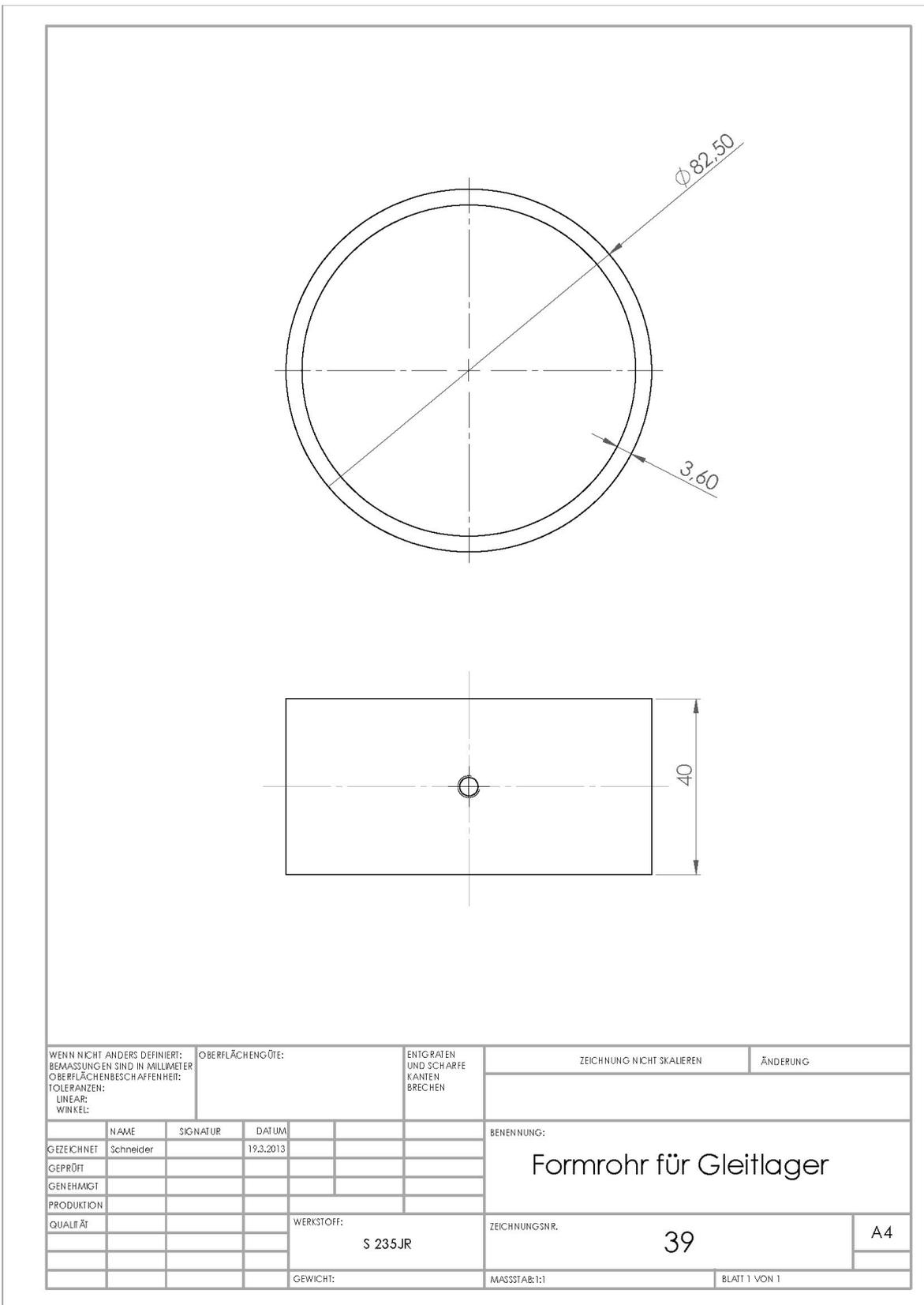


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Stirnplatte für Querträger				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					S 235JR		36		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1

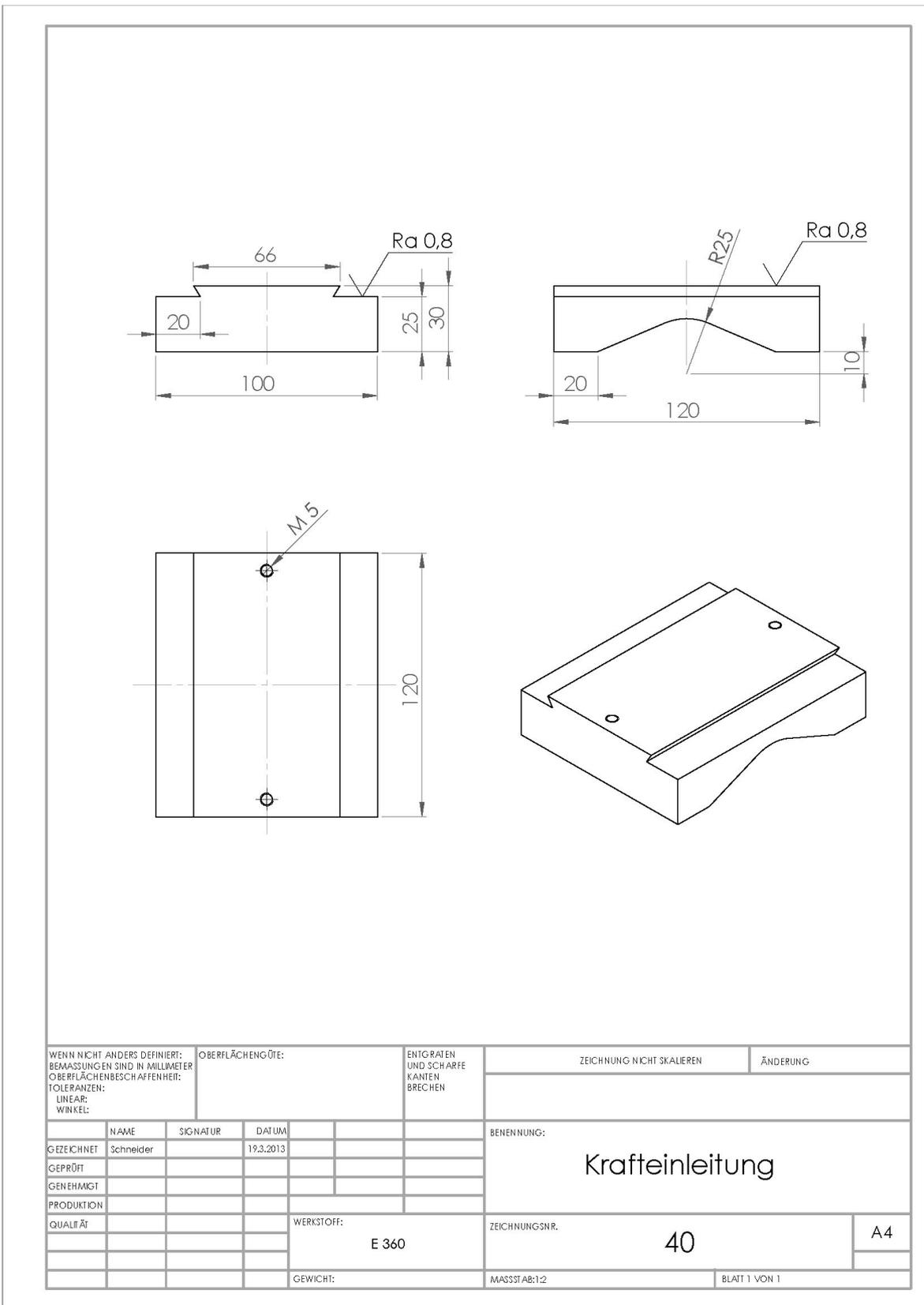


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGZEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Zentrale Platte für Querträger				
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
					S 235JR		37		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1





WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGZEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	Formrohr für Gleitlager				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					S 235JR		39		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:1		BLATT 1 VON 1

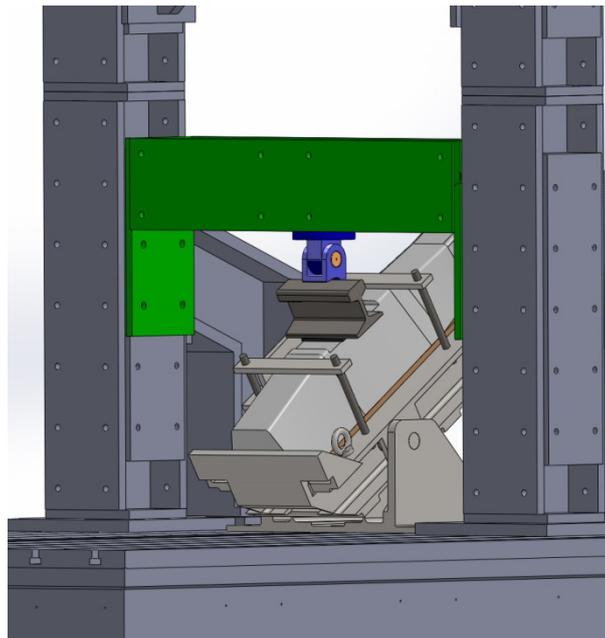


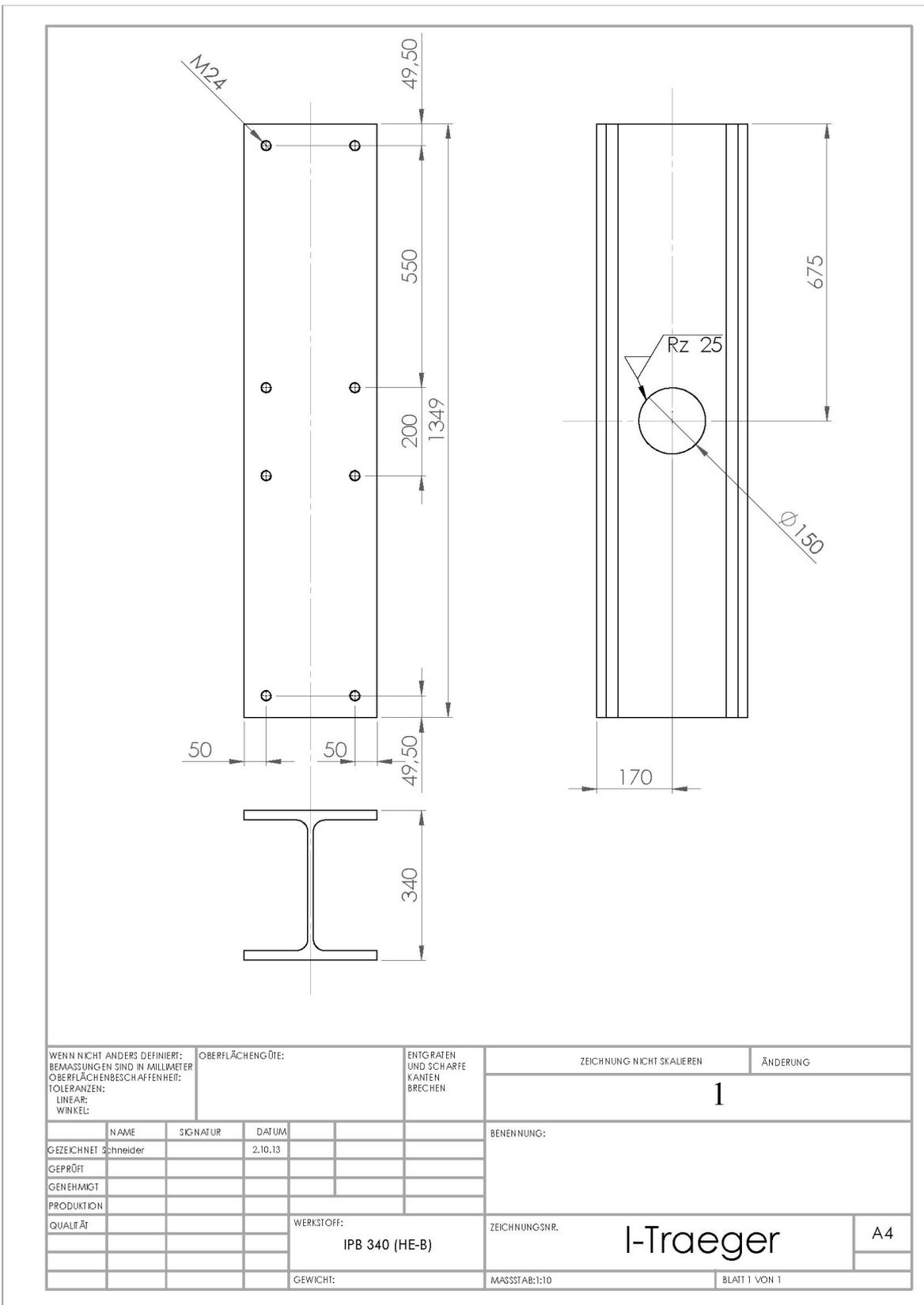
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEGEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
GEPRÜFT		Schneider		19.3.2013	<h1>Krafteinleitung</h1>				
GENEHMIGT									
PRODUKTION					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
QUALITÄT					E 360		40		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1

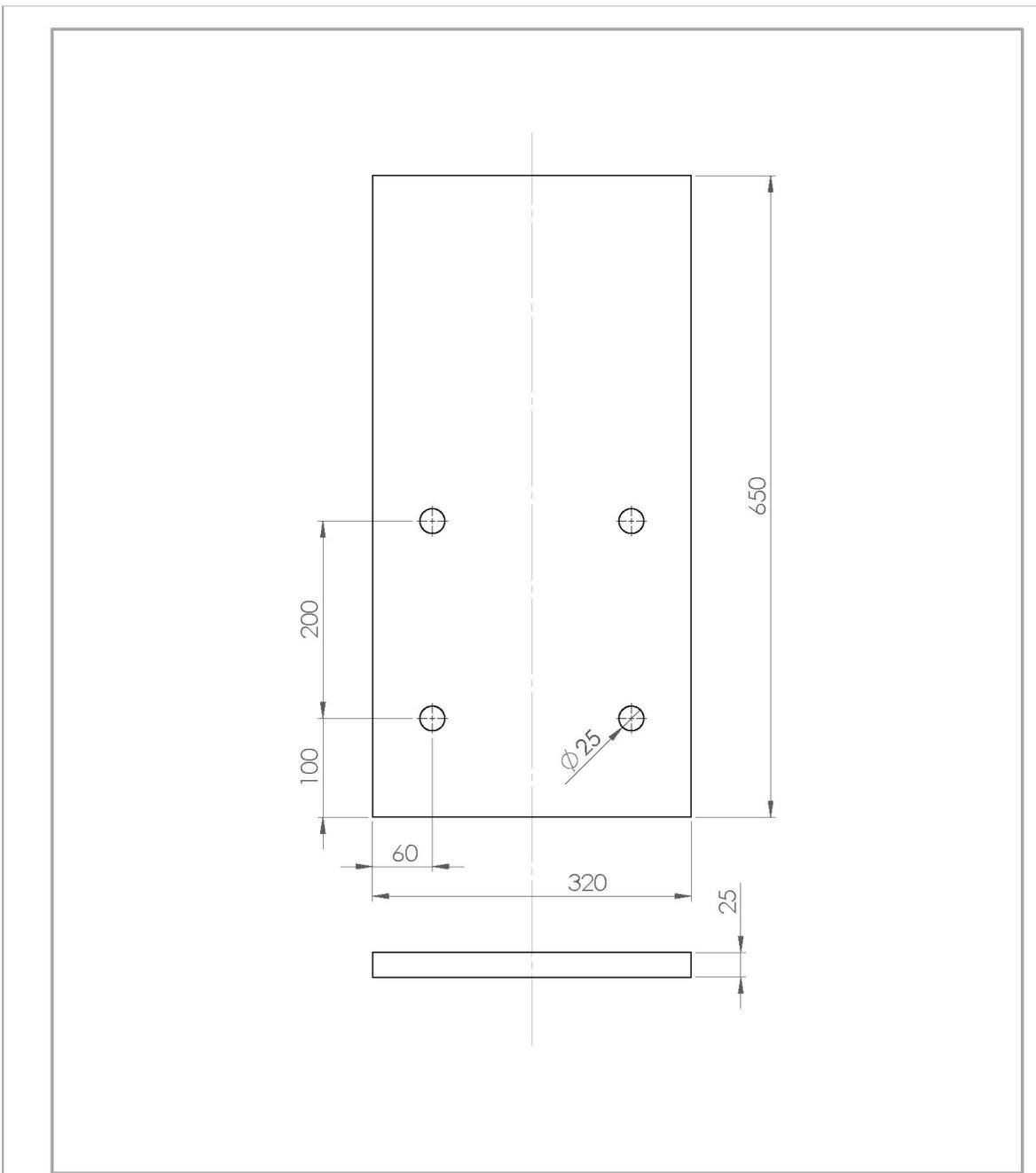
ANHANG B2 – KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN QUERTRÄGER**Konstruktionszeichnungen**

eines Prüfstandes

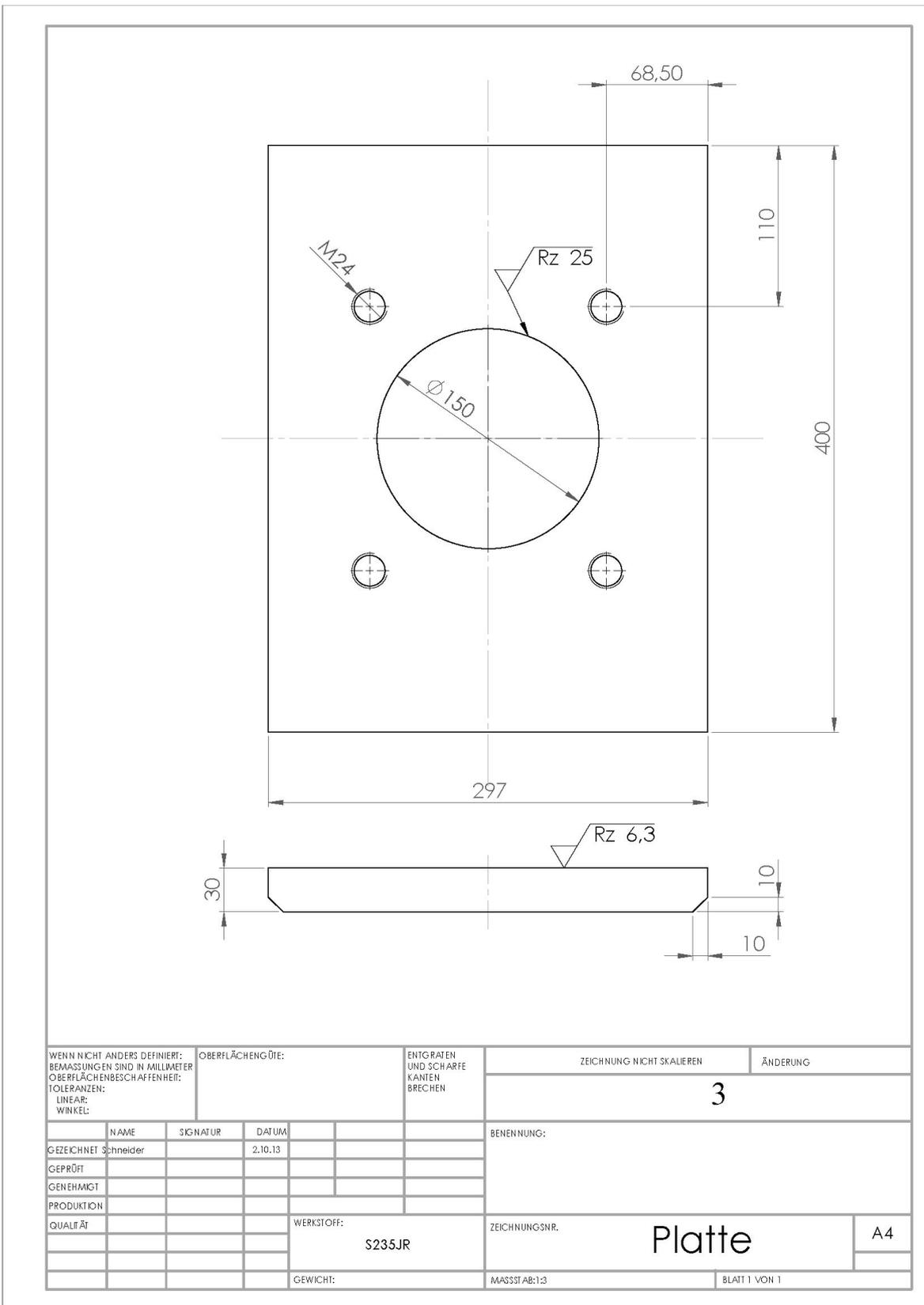
zur dynamischen Charakterisierung von
Schienenzwischenlagen

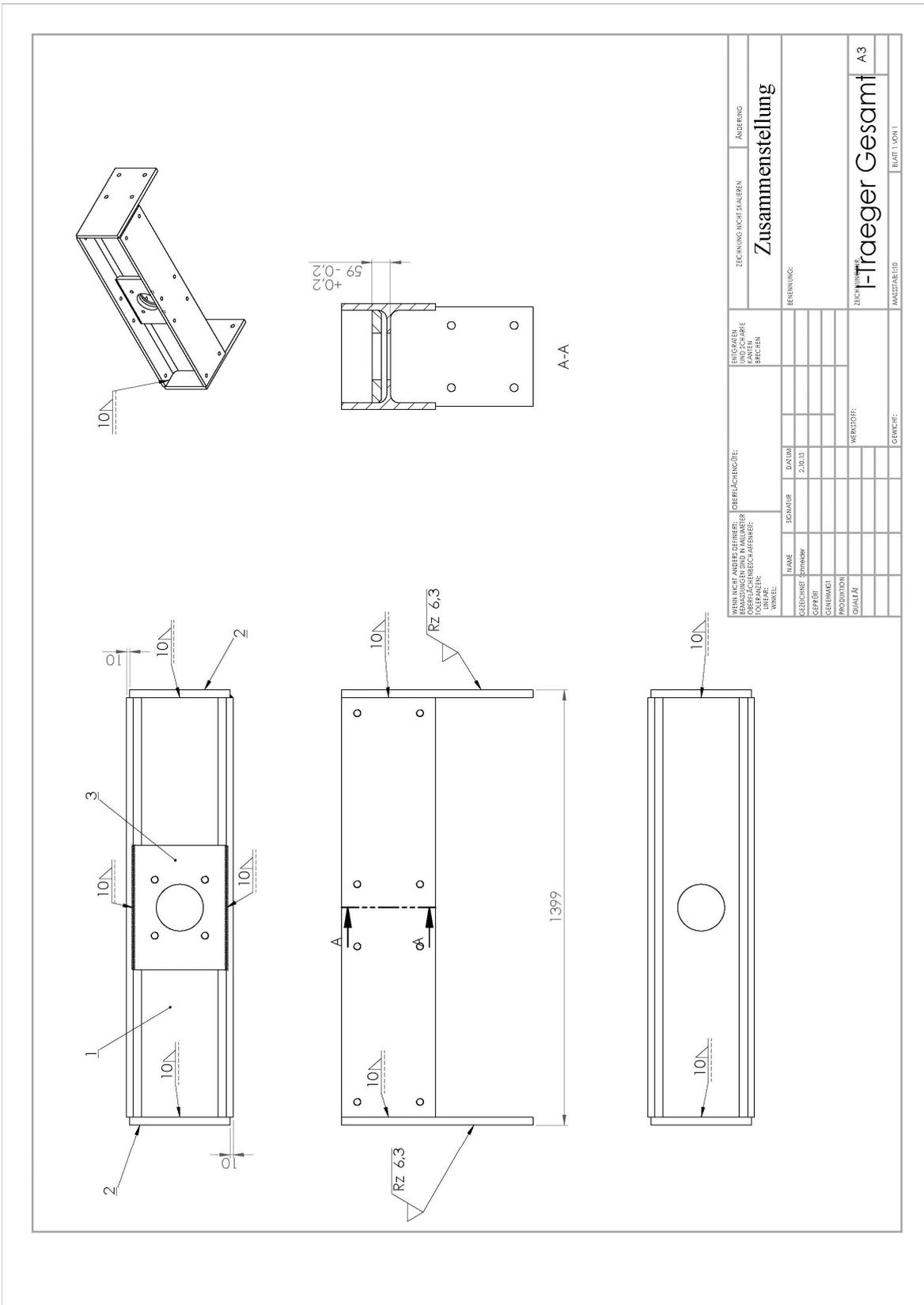


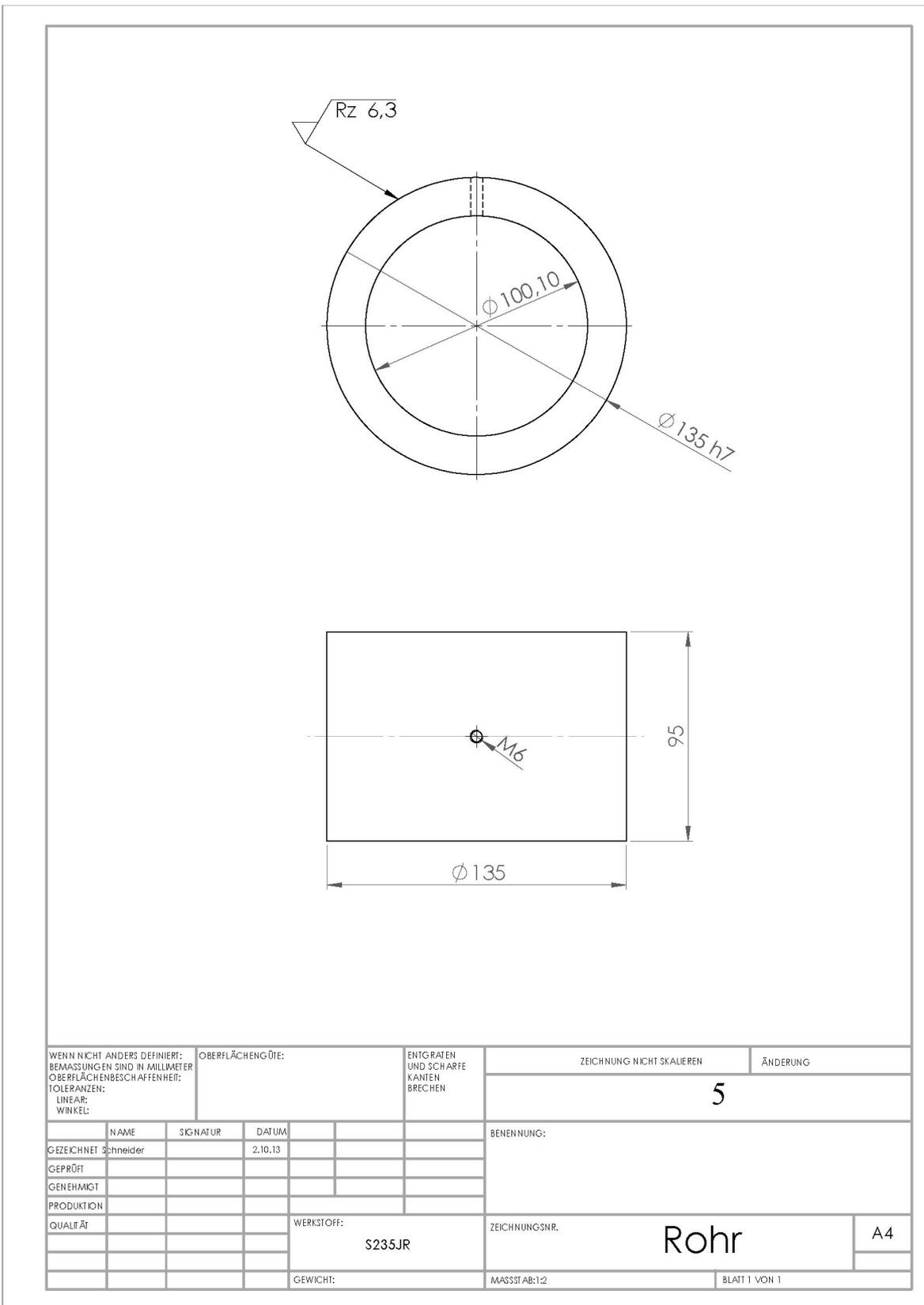


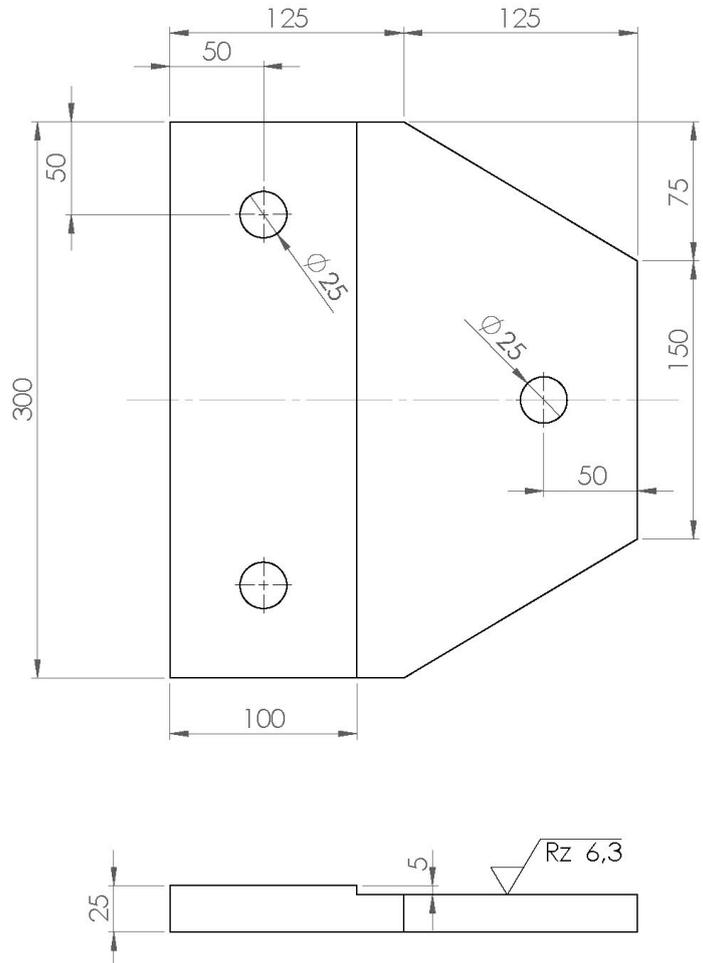


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
						2			
GEZEICHNET		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
Schneider				2.10.13		Seitenplatte			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				S235JR					
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:5		BLATT 1 VON 1	

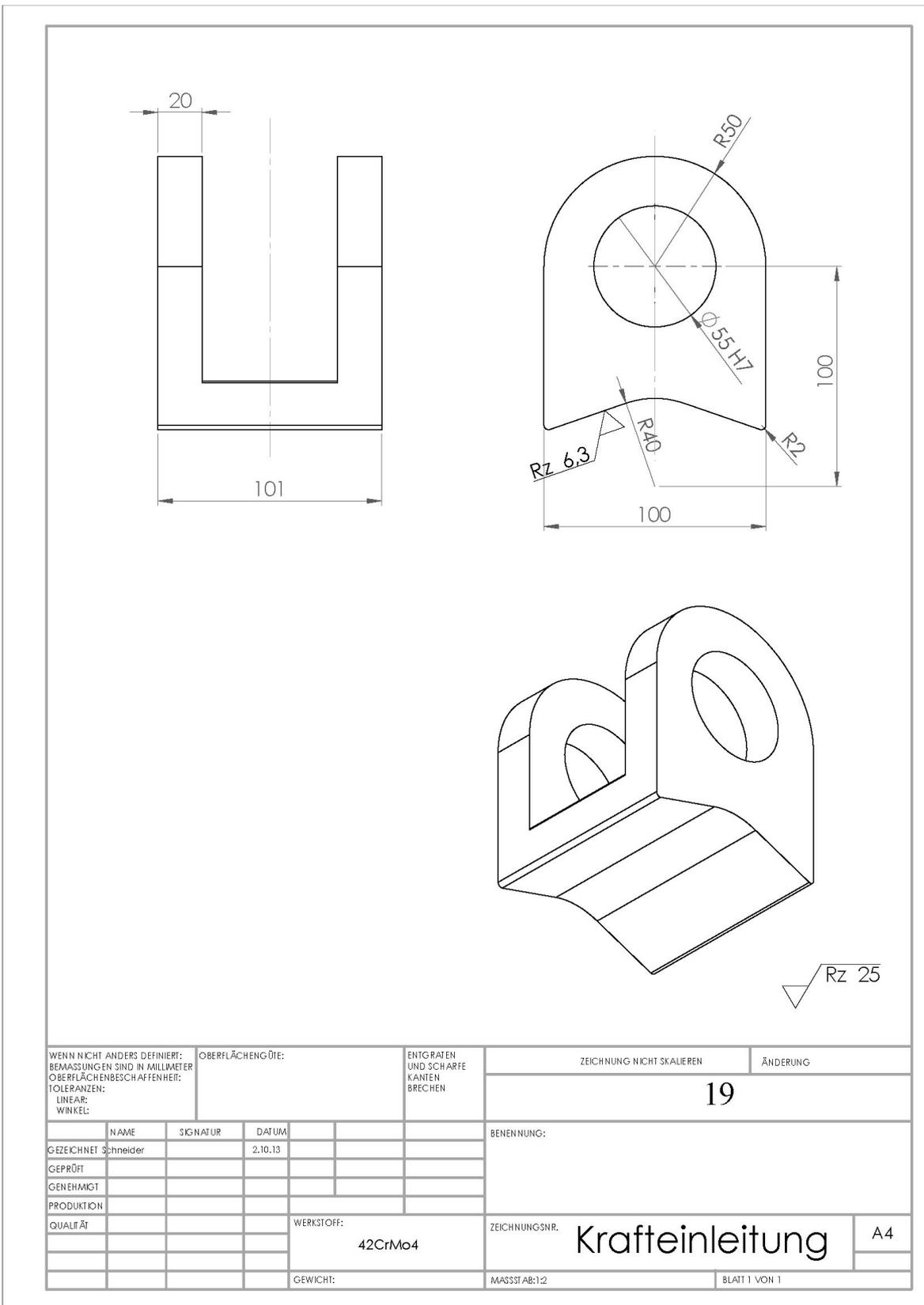




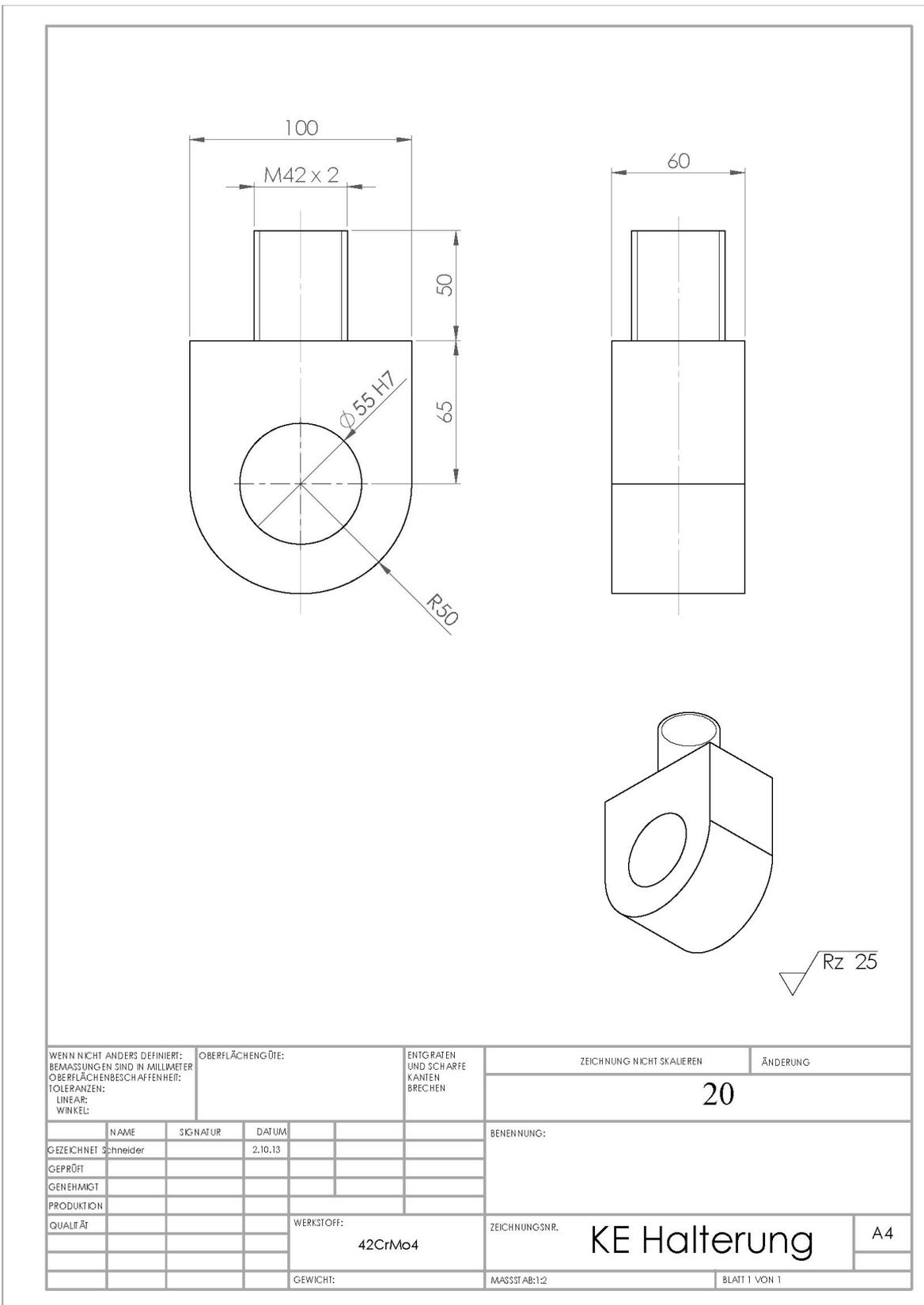


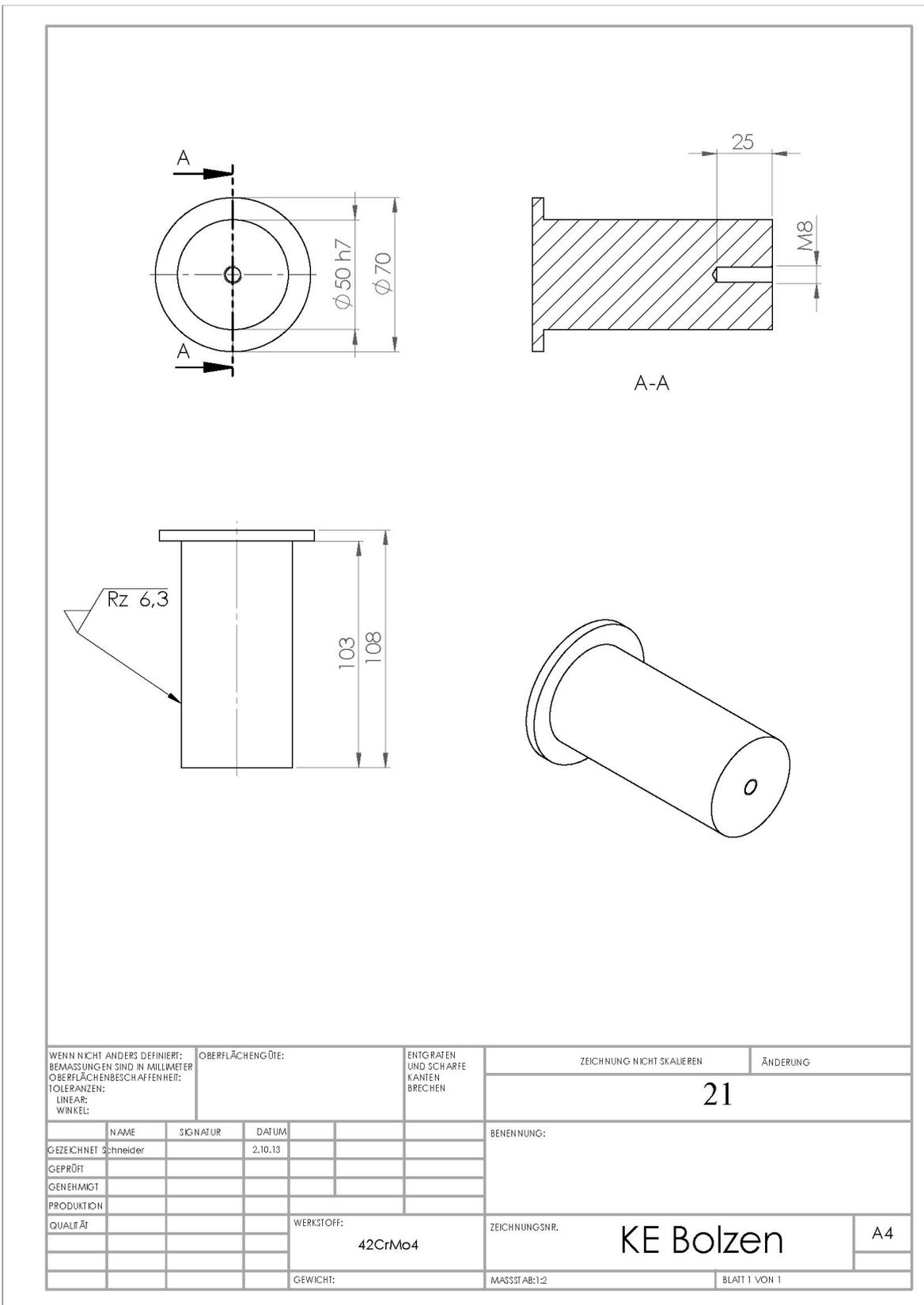


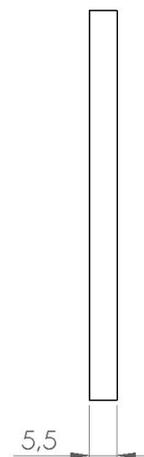
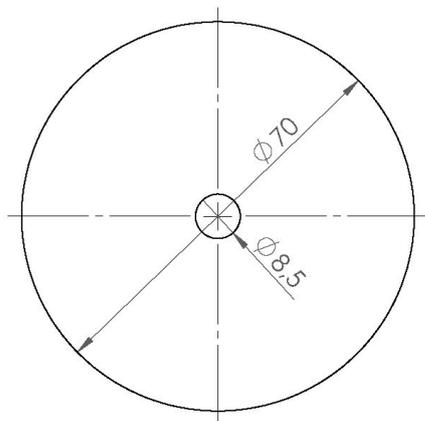
WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
						6			
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Schneider		2.10.13					
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				S235JR		Seitenhalterung			
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:3		BLATT 1 VON 1	



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
						19			
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET		Schneider		2.10.13		Krafteinleitung			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4	
				42CrMo4					
				GEWICHT:		MASSSTAB:1:2		BLATT 1 VON 1	

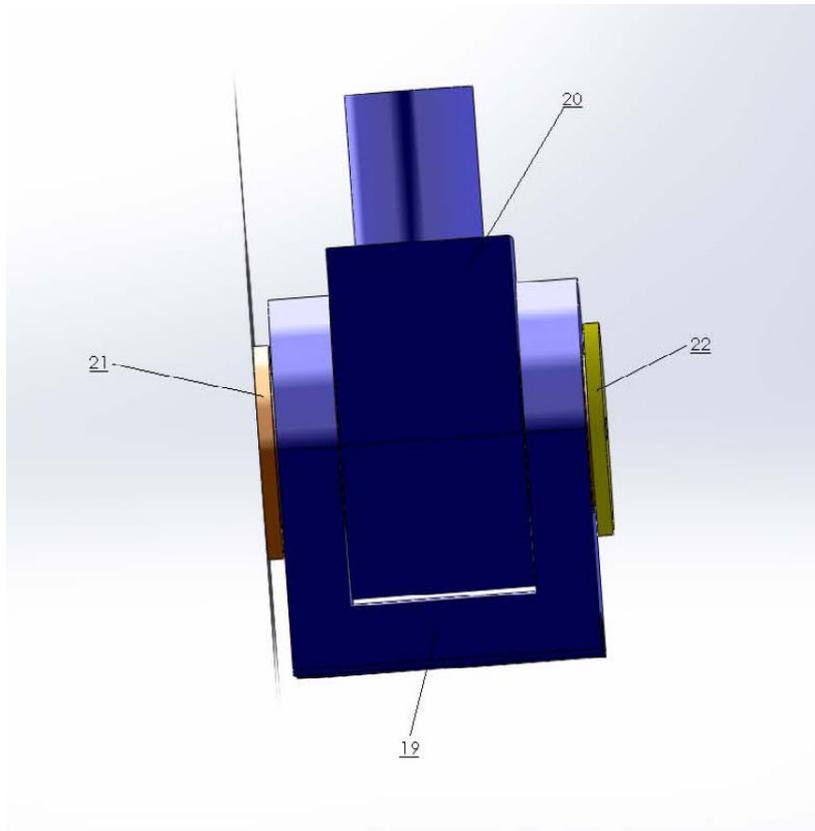
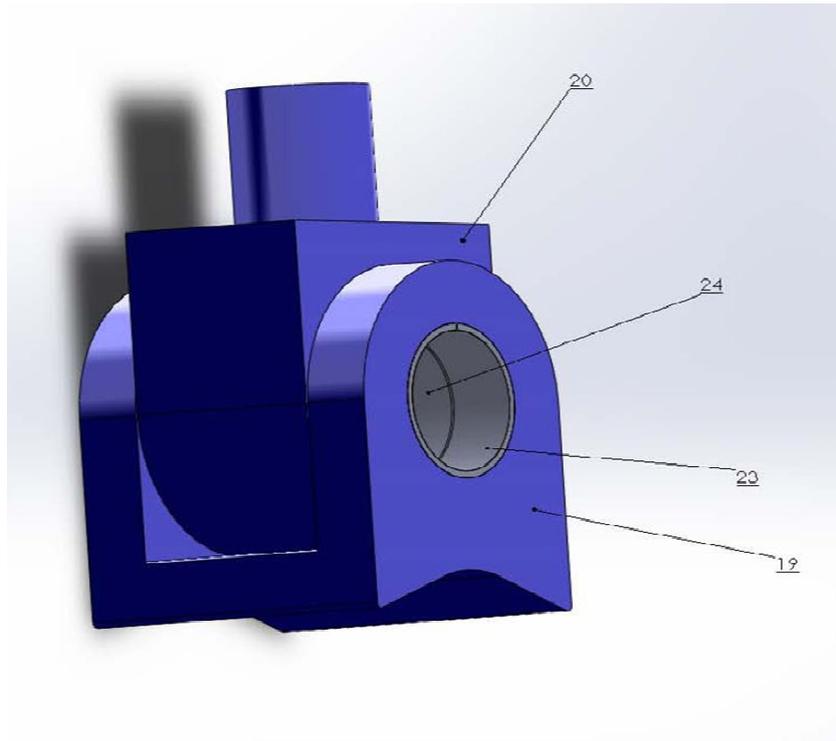






$\sqrt{Rz\ 25}$

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:						22			
GEZEICHNET		NAME	SIGNATUR	DATUM	BENENNUNG:				
Schneider				2.10.13					
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT					WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A4
					42CrMo4		KE Scheibe		
					GEWICHT:		MASSSTAB:1:1		BLATT 1 VON 1



ANHANG C1 – MESSDATENBLÄTTER PRÜFFELD

Messdatenblätter

aus den Prüfungen der statischen
und dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten
an Schienenzwischenlagen
ermittelt am Bauteilprüffeld

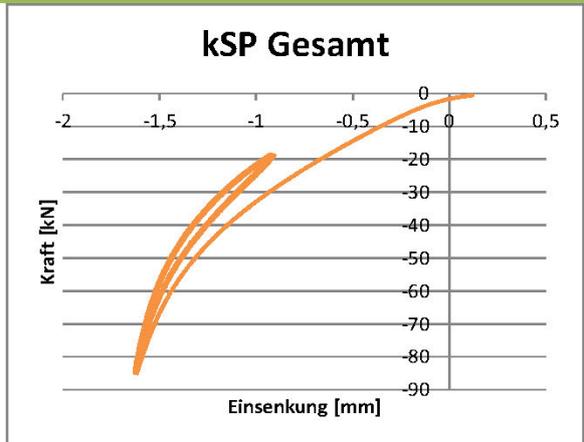
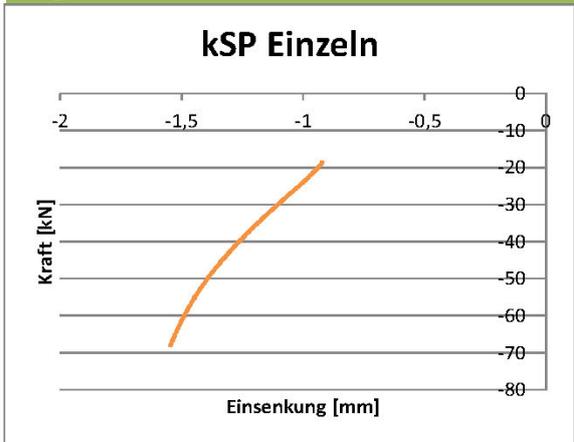
Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 12
Prüfkategorie	C		
Prüfling	ZW700		
Probennummer	Probe1		

Ermittelte Werte

kSP	83,9	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

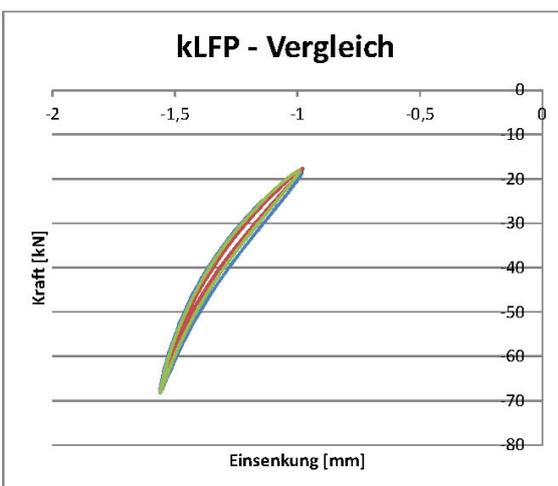
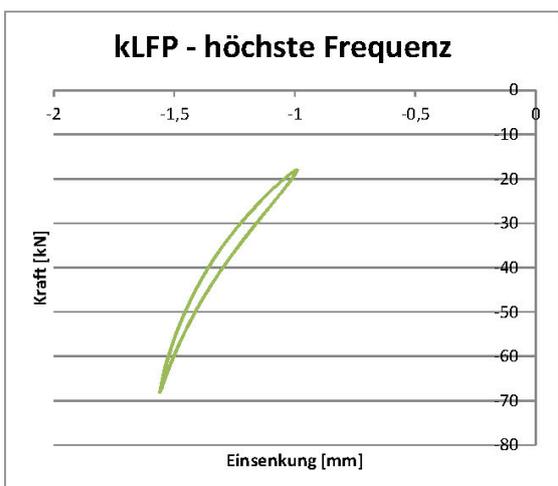
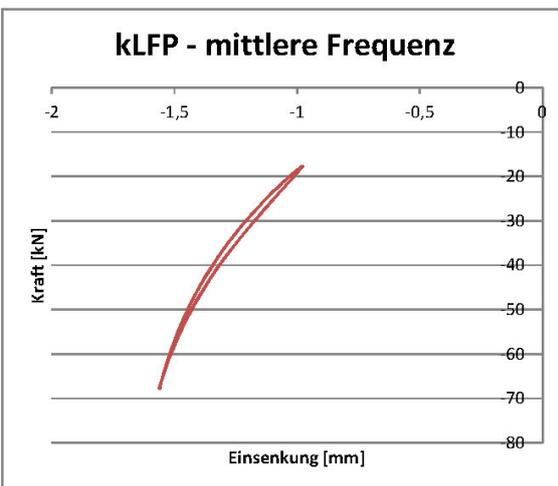
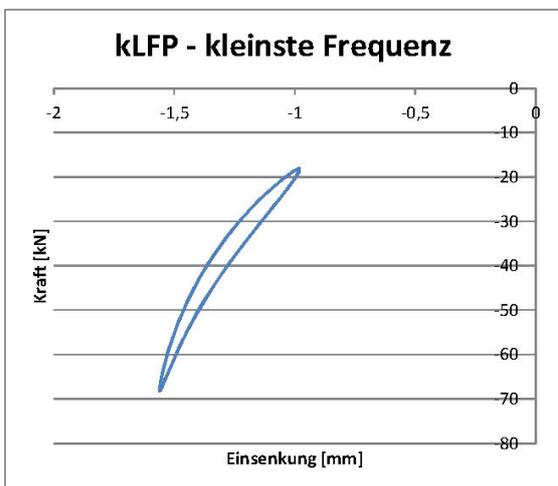
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	ZW700
Probennummer	Probe1
Testlauf	Testlauf 702

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	90,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	90,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	91,9	kN/mm

Diagramme



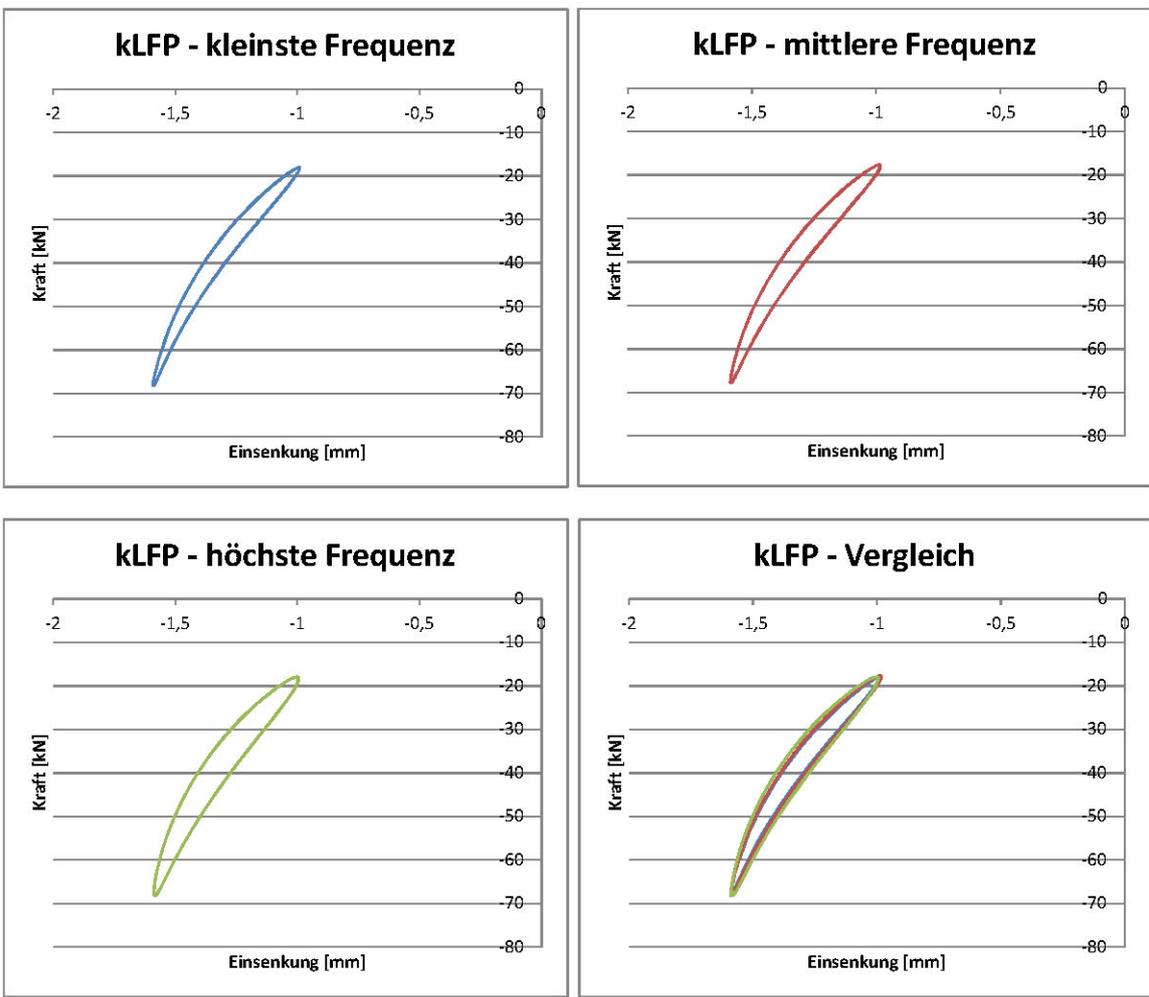
Beschreibung des Testlaufs

Datum der Messung	07.06.2013	Prüffrequenzen	5	Hz
Maschine	Prüffeld		10	Hz
Prüfnorm	EN 13146		20	Hz
Prüfkategorie	C			
Prüfling	ZW700	Messverzögerung	0,004	s
Probennummer	Probe2	Messrate	50	
Testlauf	Testlauf 700			

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	88,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	87,9	kN/mm
kLFP - 20 Hz	89,7	kN/mm

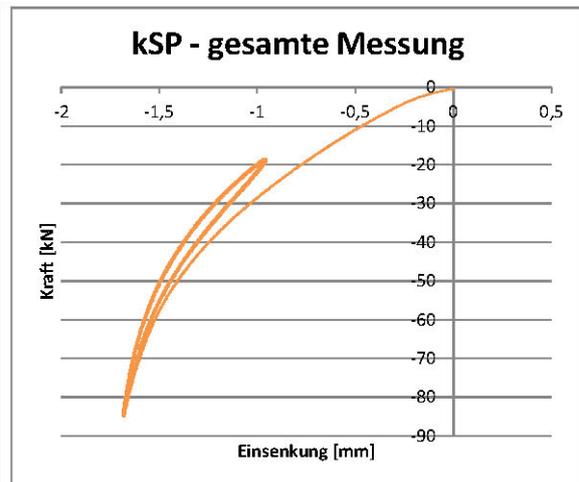
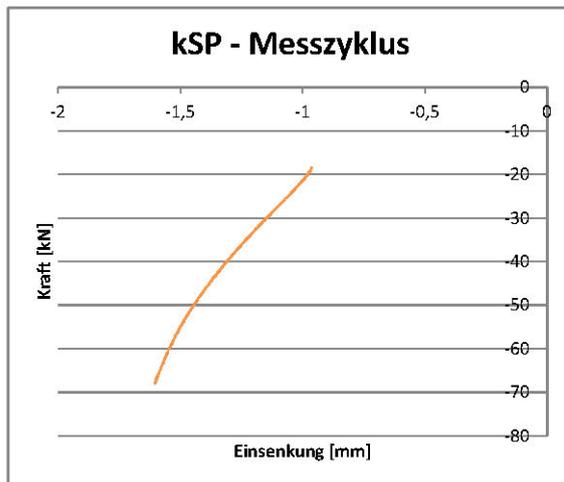
Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	ZW700
Probennummer	Probe2
Testlauf	Testlauf 700

kSP 82,4 kN/mm



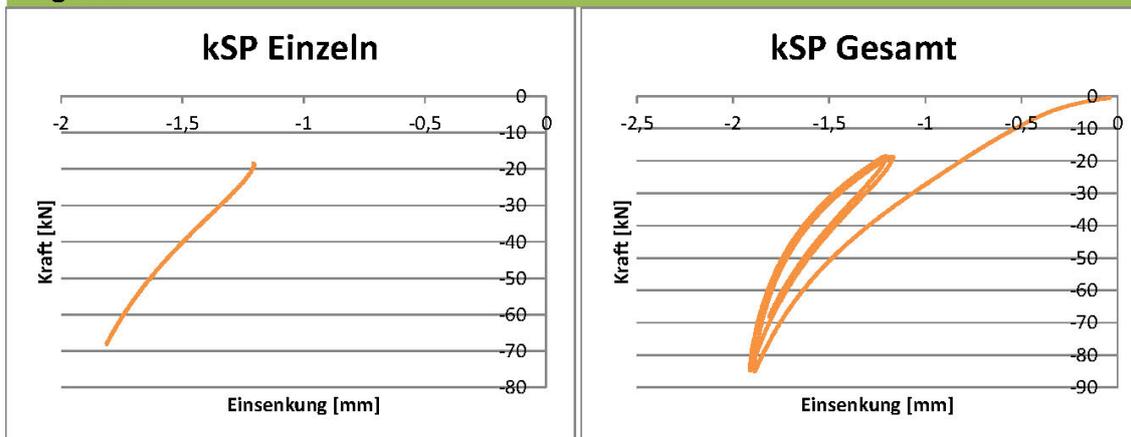
Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15126
Probennummer	Probe1

Datum der Messung	07.06.2013
Testlauf	Testlauf 9

Ermittelte Werte

kSP	88,8	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

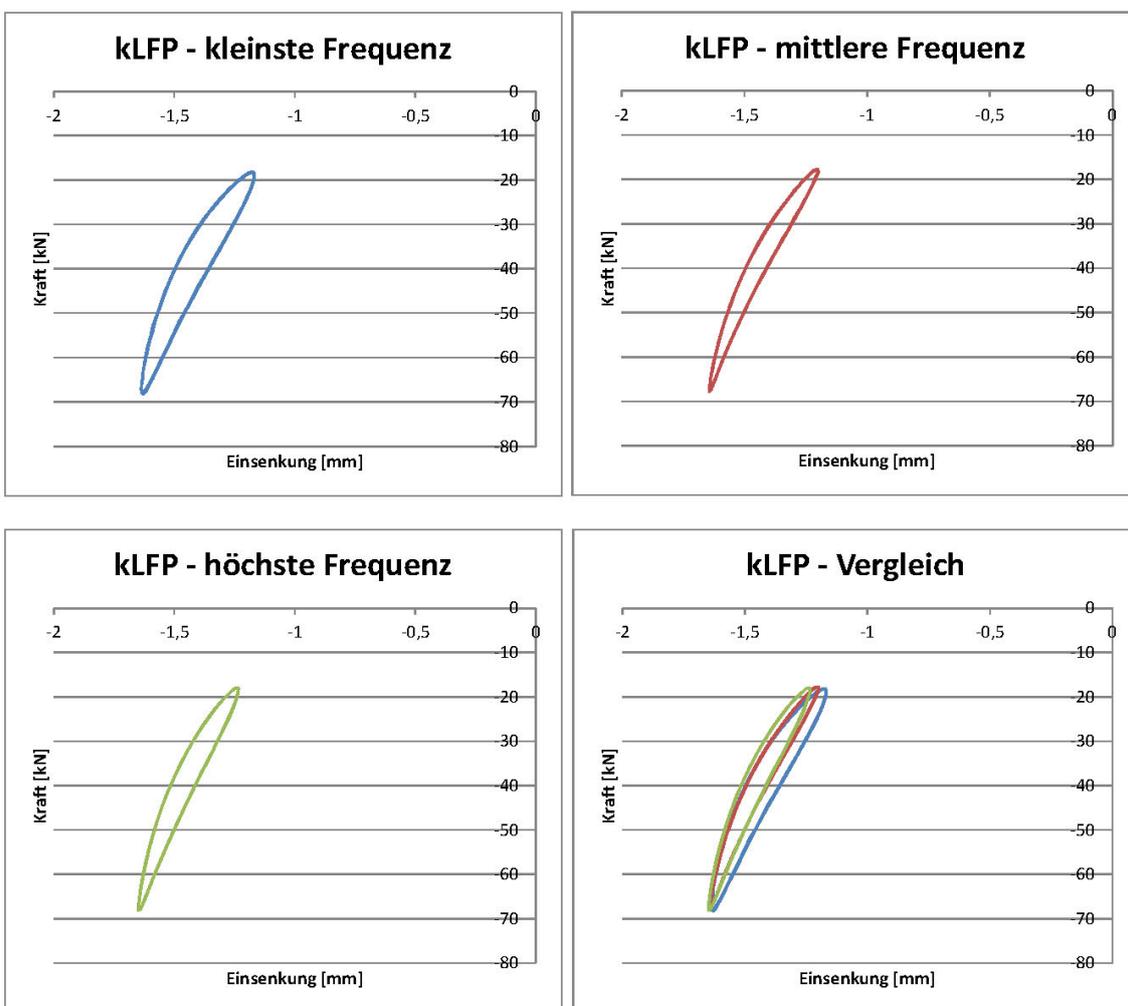
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15126
Probennummer	Probe1
Testlauf	15126

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	116,0	kN/mm
kLFP - 10 Hz	122,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	131,5	kN/mm

Diagramme

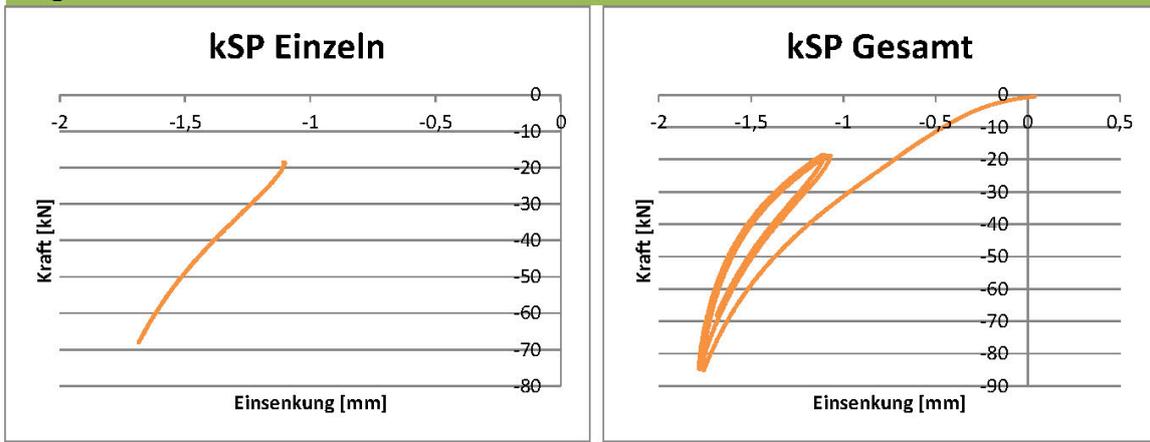


Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 10
Prüfkategorie	C		
Prüfling	W15126		
Probennummer	Probe2		

Ermittelte Werte

kSP	89,6	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

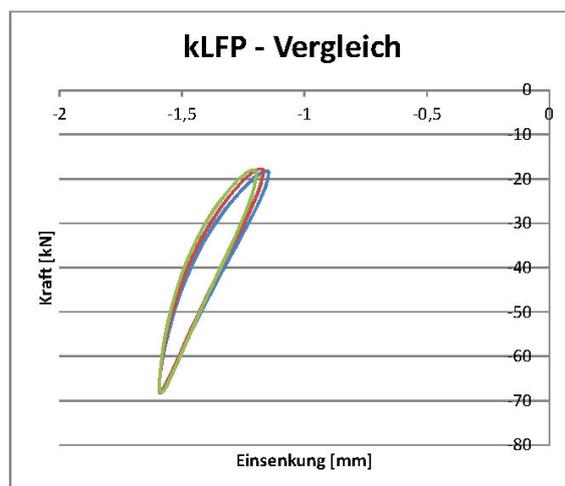
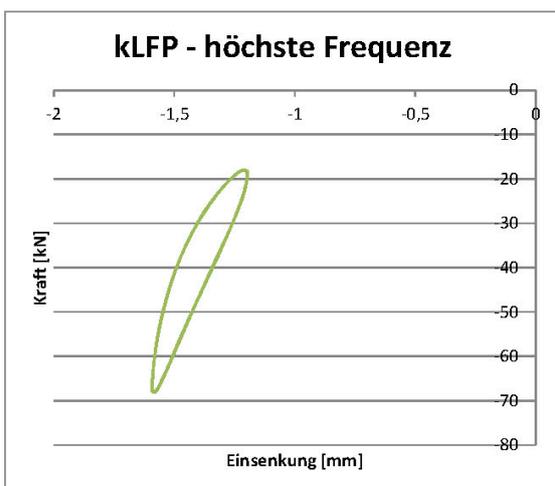
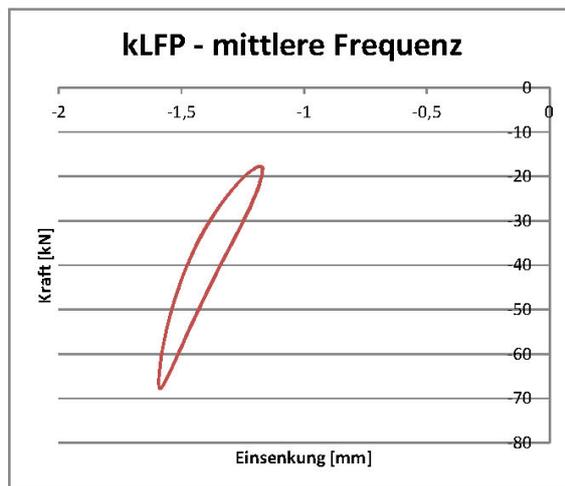
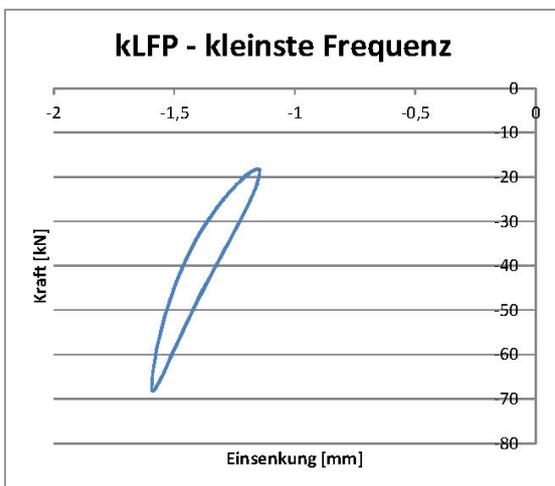
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15126
Probennummer	Probe2
Testlauf	15130

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,004	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	116,9	kN/mm
kLFP - 10 Hz	123,6	kN/mm
kLFP - 20 Hz	132,8	kN/mm

Diagramme



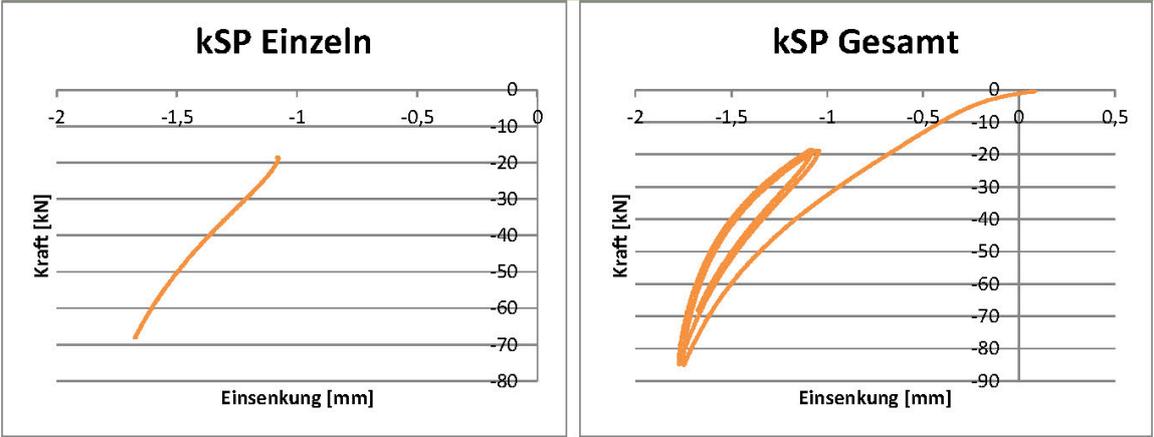
Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 11
Prüfkategorie	C		
Prüfling	W15126		
Probennummer	Probe3		

Ermittelte Werte

kSP	89,6	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

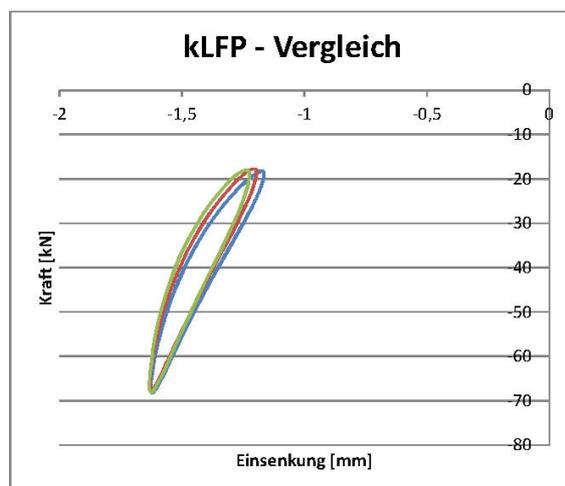
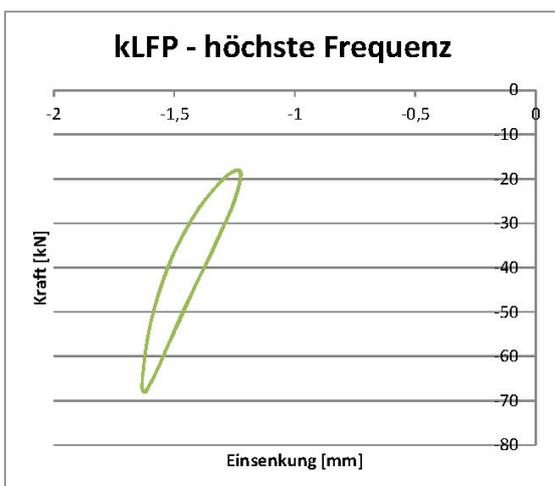
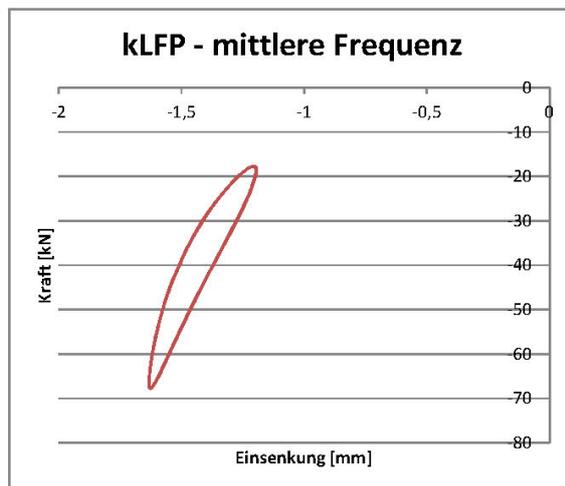
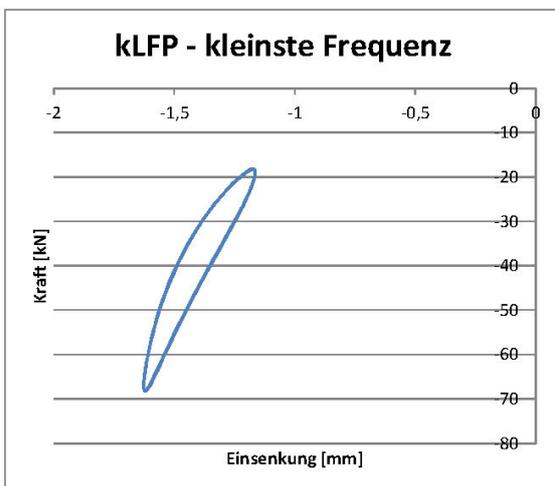
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15126
Probennummer	Probe3
Testlauf	15131

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,004	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	115,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	122,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	130,8	kN/mm

Diagramme

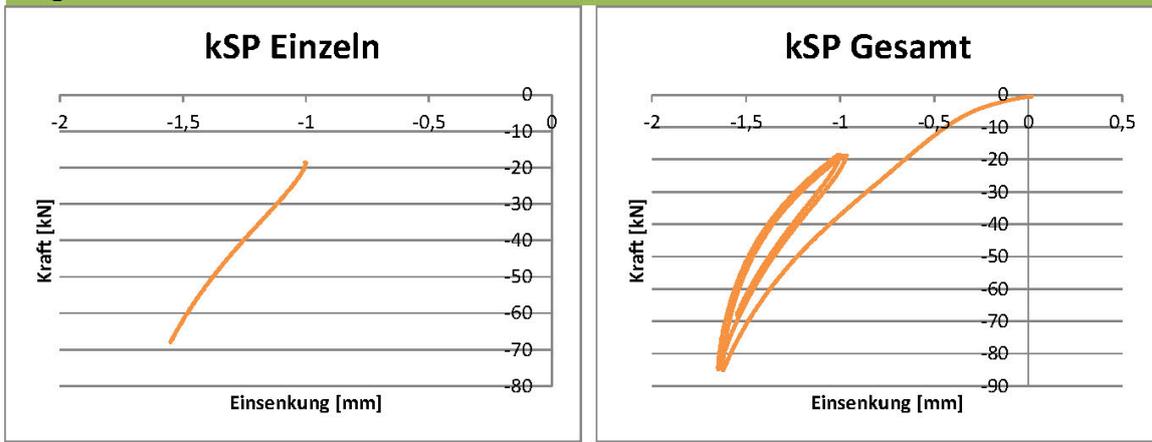


Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 6
Prüfkategorie	C		
Prüfling	W15127		
Probennummer	Probe1		

Ermittelte Werte

kSP	96,4	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

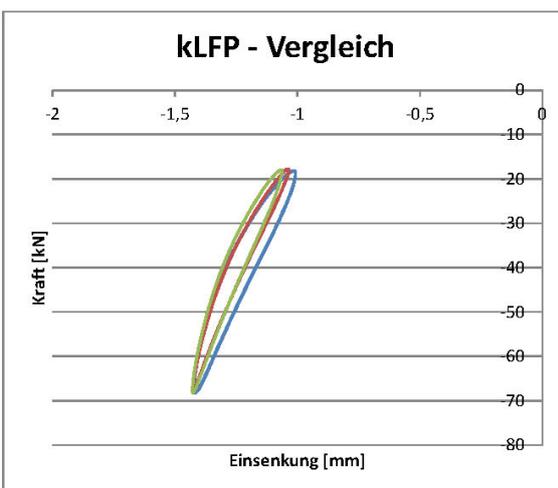
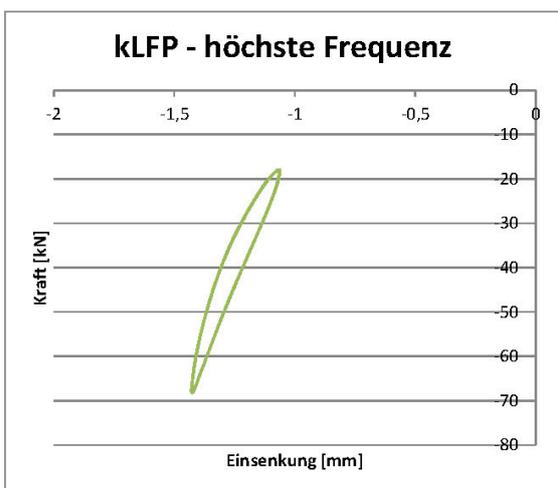
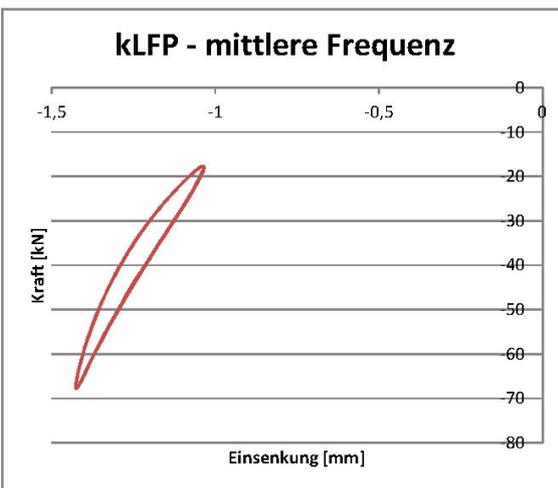
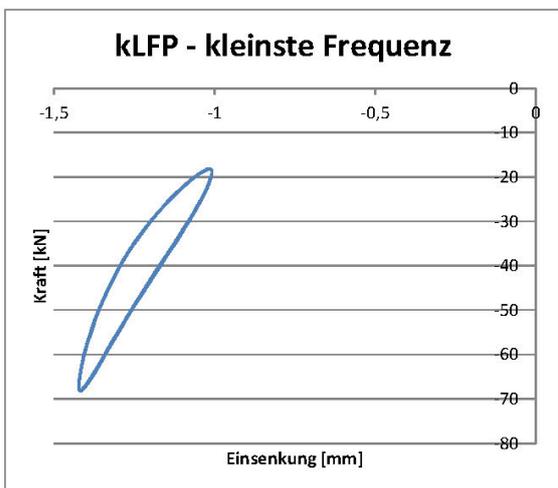
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15127
Probennummer	Probe1
Testlauf	15127

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	128,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	136,4	kN/mm
kLFP - 20 Hz	146,3	kN/mm

Diagramme

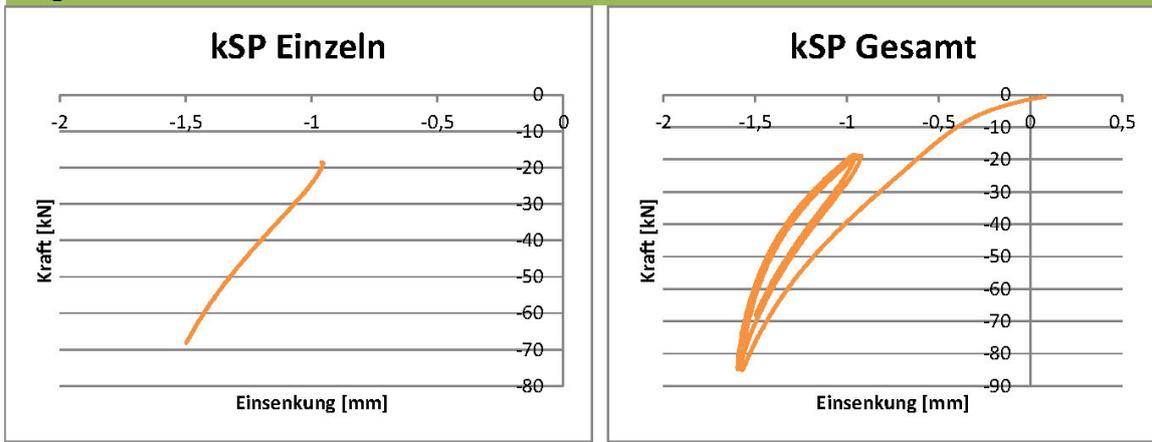


Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 7
Prüfkategorie	C		
Prüfling	W15127		
Probennummer	Probe2		

Ermittelte Werte

kSP	97,8	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

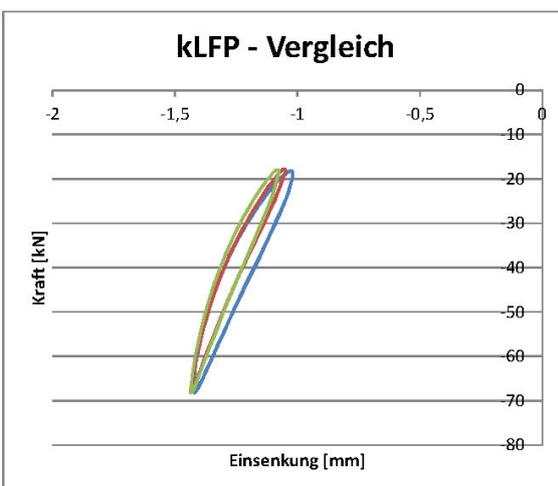
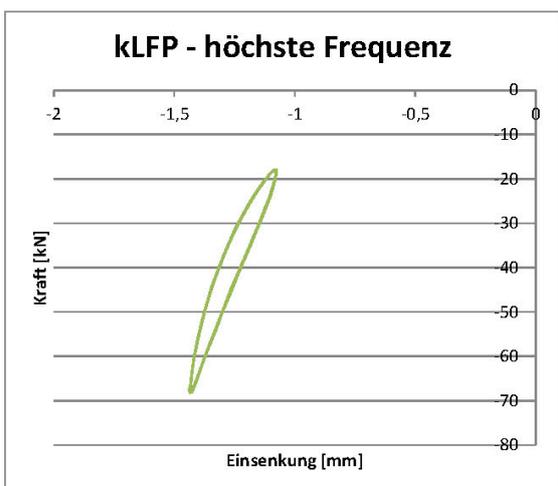
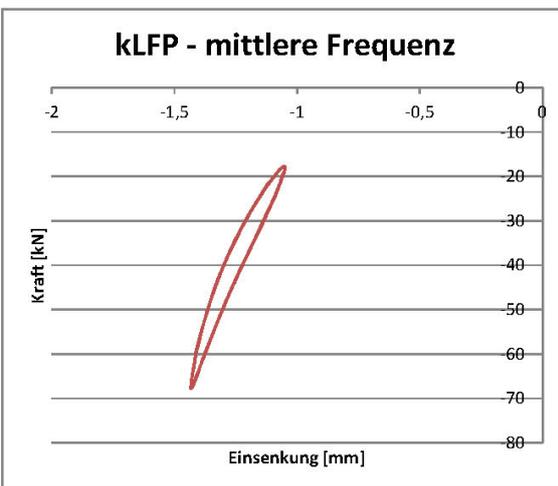
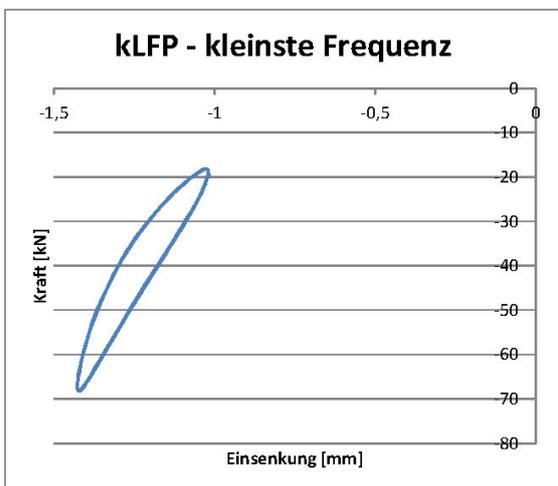
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15127
Probennummer	Probe2
Testlauf	15128

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	128,9	kN/mm
kLFP - 10 Hz	136,6	kN/mm
kLFP - 20 Hz	146,7	kN/mm

Diagramme



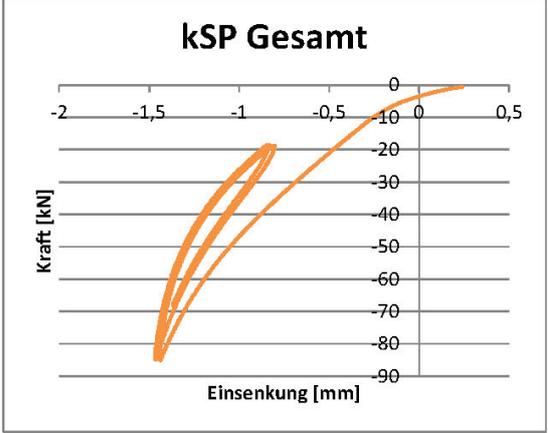
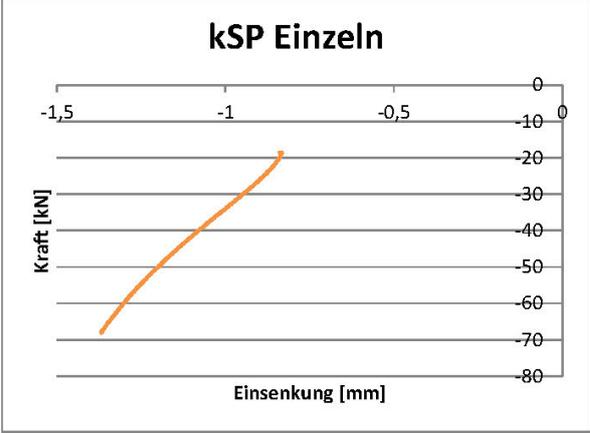
Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 8
Prüfkategorie	C		
Prüfling	W15127		
Probnummer	Probe3		

Ermittelte Werte

kSP	97,9	kN/mm
-----	------	-------

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

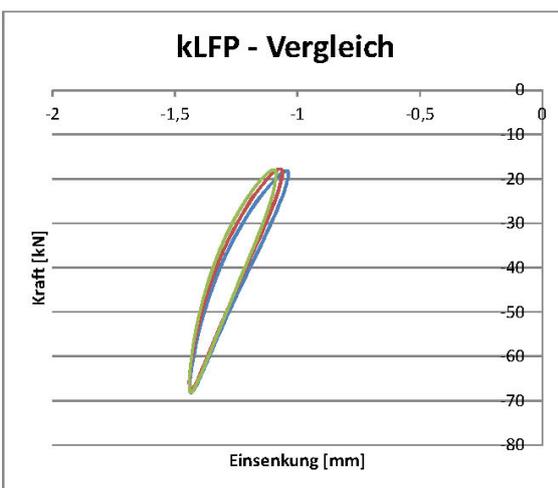
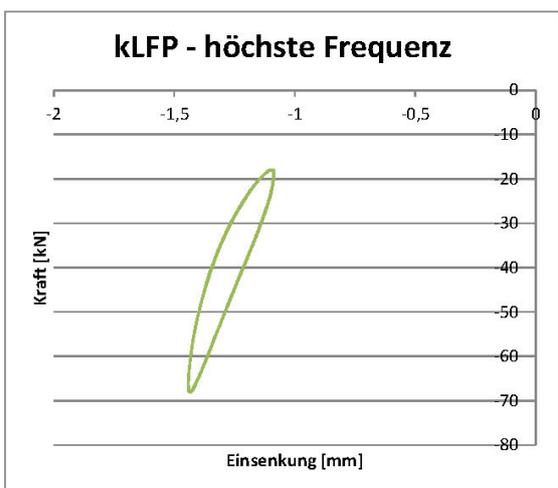
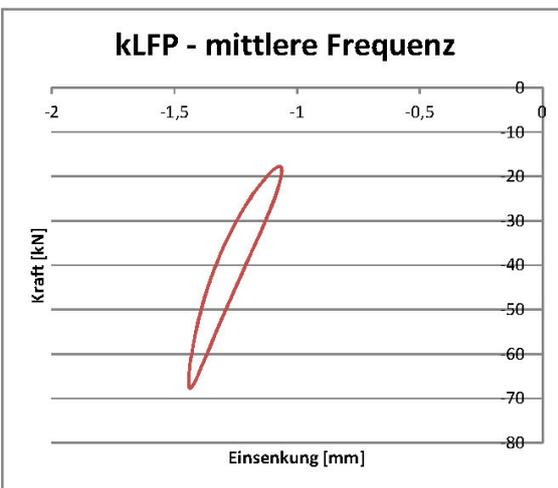
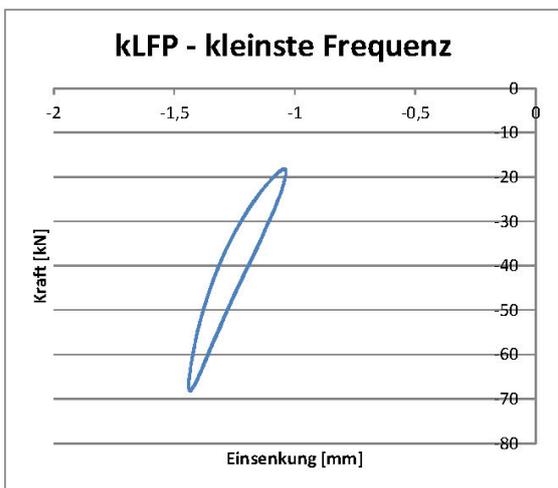
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	C
Prüfling	W15127
Probennummer	Probe3
Testlauf	15129

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,004	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	129,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	137,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	147,6	kN/mm

Diagramme



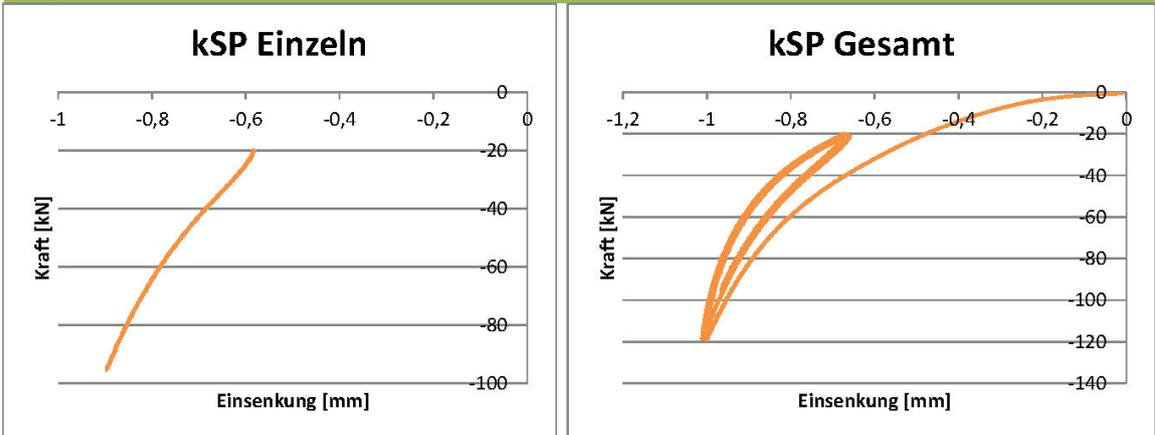
Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 1
Prüfkategorie	E		
Prüfling	W12790		
Probennummer	Probe1		

Ermittelte Werte

kSP	258,6	kN/mm
-----	-------	-------

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

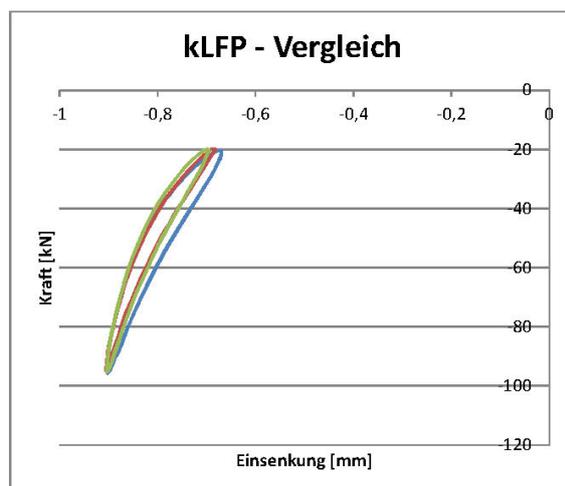
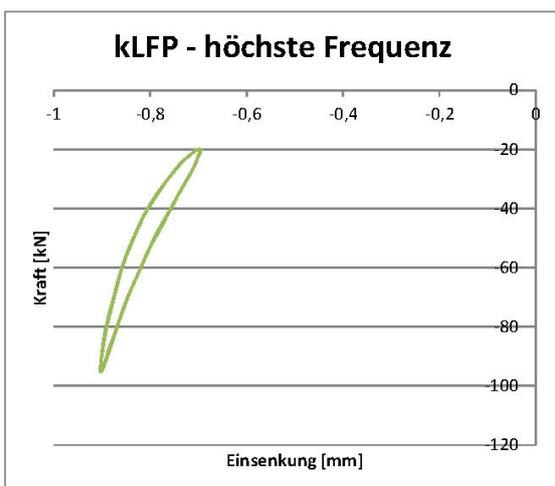
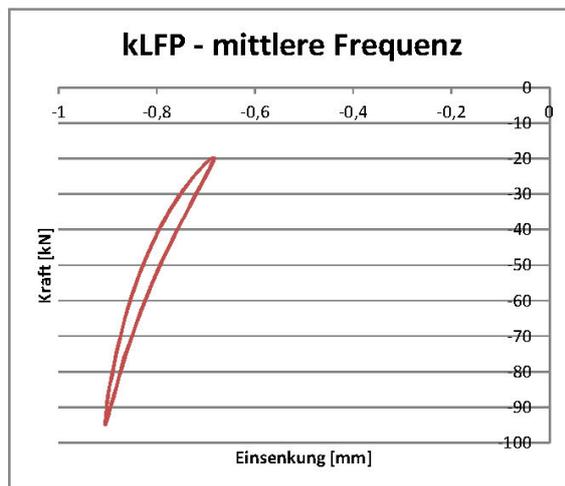
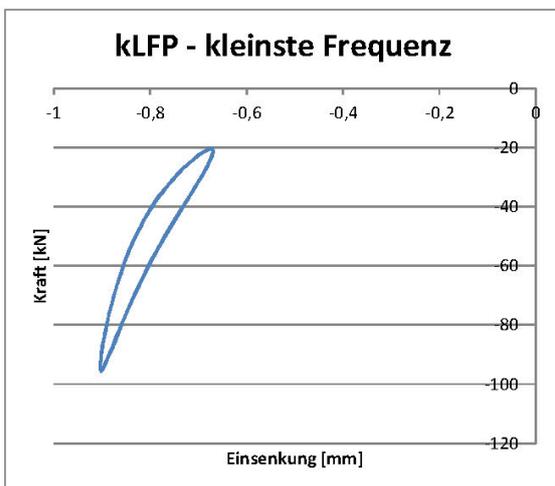
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	E
Prüfling	W12790
Probennummer	Probe1
Testlauf	12790

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	327,9	kN/mm
kLFP - 10 Hz	344,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	367,0	kN/mm

Diagramme

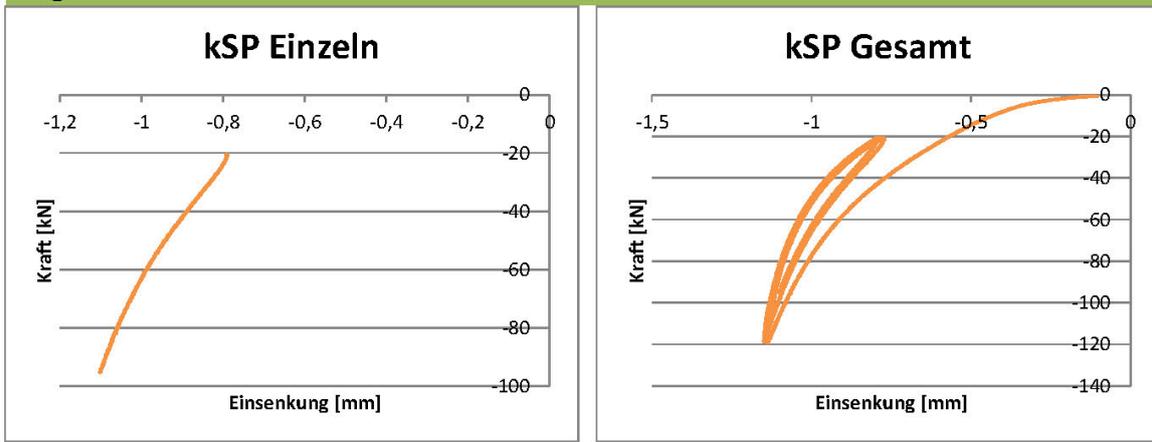


Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 2
Prüfkategorie	E		
Prüfling	W12790		
Probennummer	Probe2		

Ermittelte Werte

kSP	257,5	kN/mm
-----	-------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

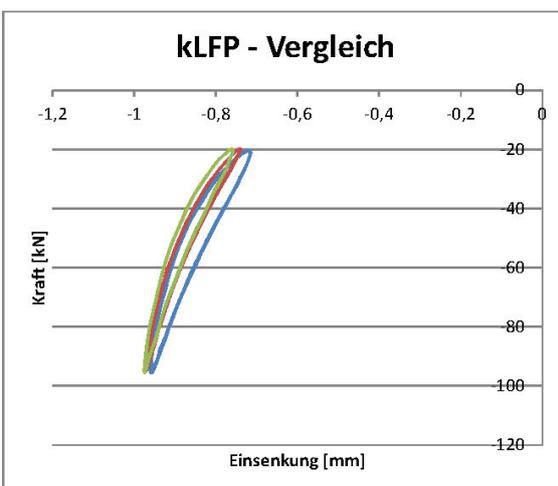
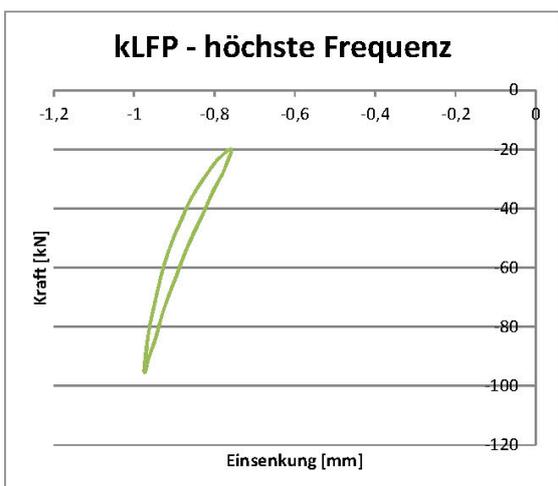
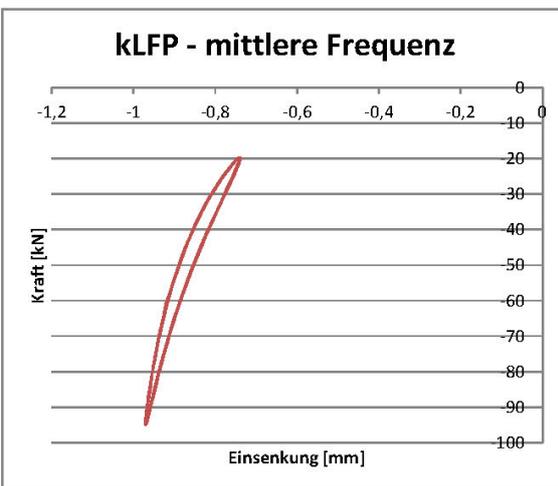
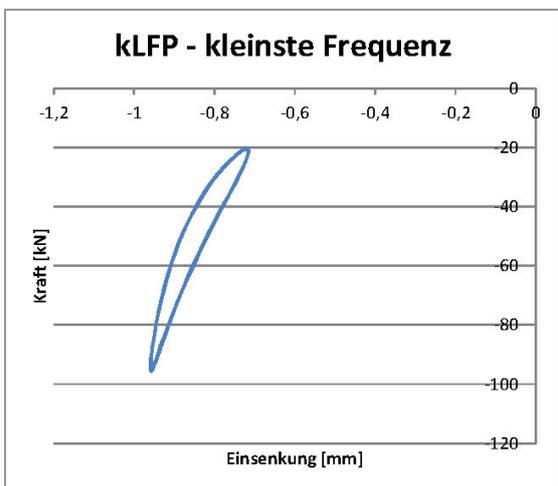
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	E
Prüfling	W12790
Probennummer	Probe2
Testlauf	12791

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	327,0	kN/mm
kLFP - 10 Hz	344,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	364,3	kN/mm

Diagramme



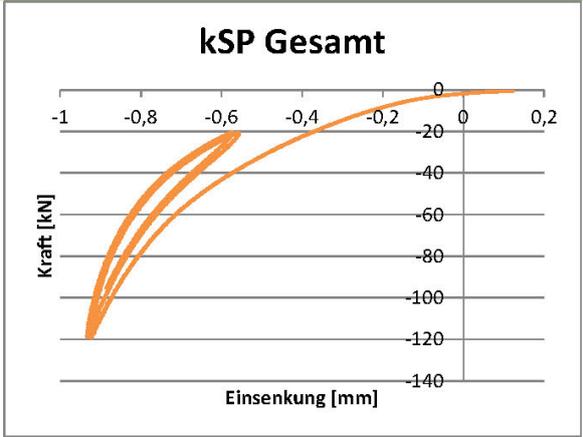
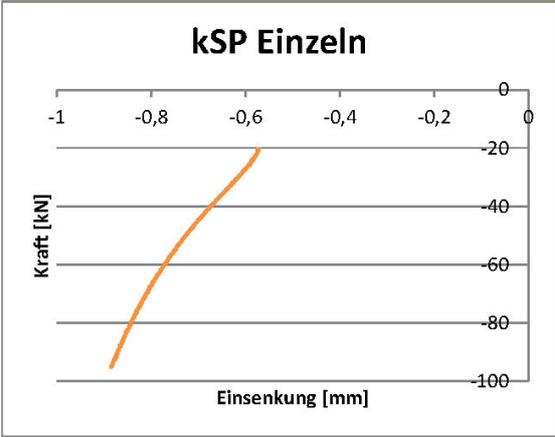
Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 3
Prüfkategorie	E		
Prüfling	W12790		
Probennummer	Probe3		

Ermittelte Werte

kSP	259,9	kN/mm
-----	-------	-------

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

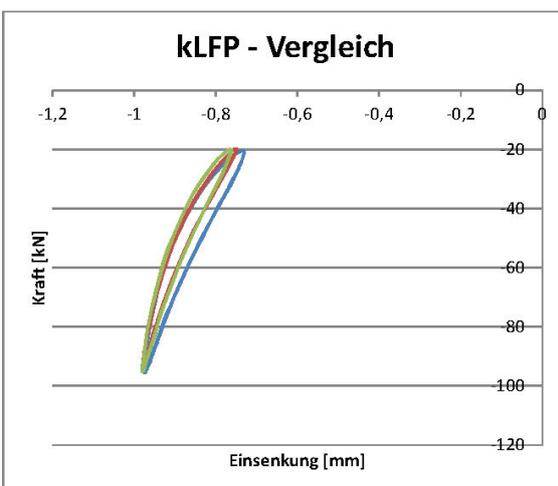
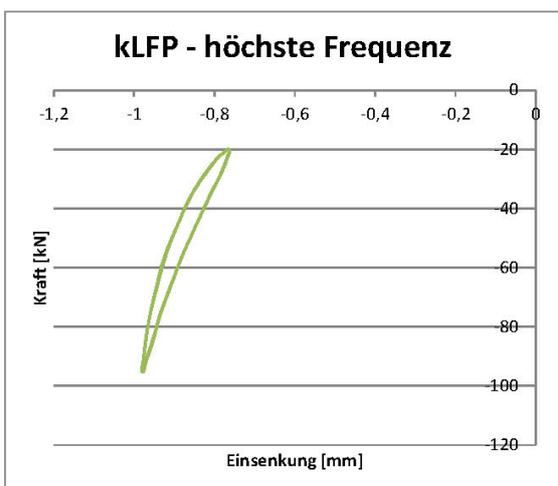
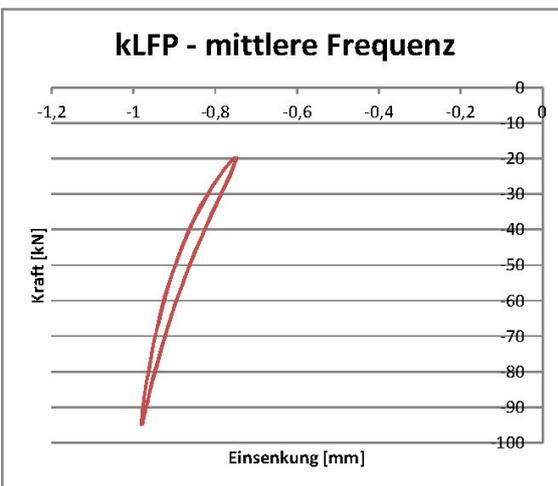
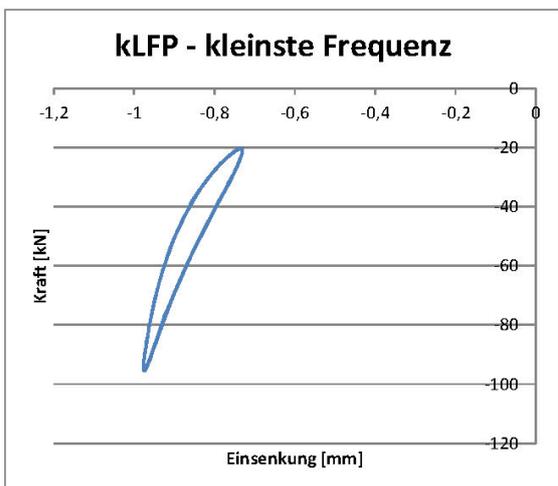
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	E
Prüfling	W12790
Probennummer	Probe3
Testlauf	12792

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	328,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	347,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	368,8	kN/mm

Diagramme

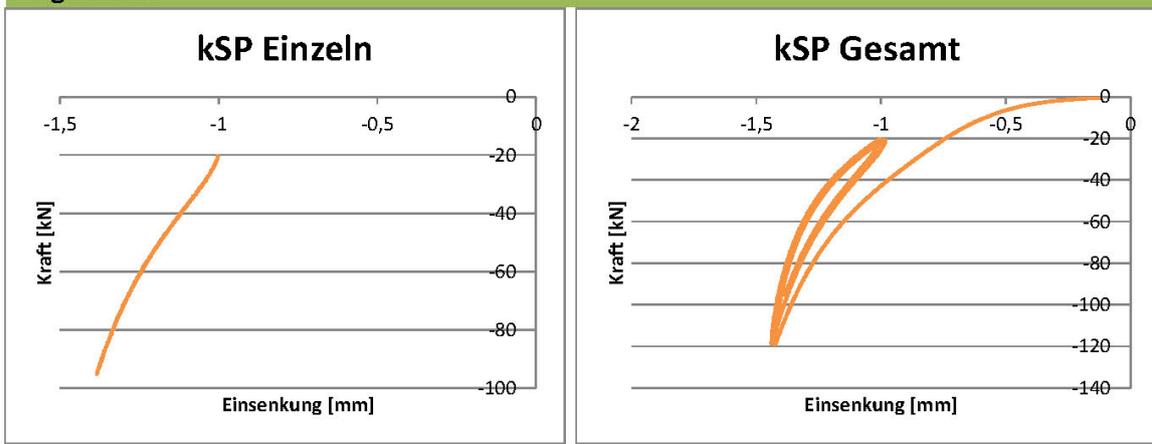


Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 4
Prüfkategorie	E		
Prüfling	W12790		
Probennummer	Probe4		

Ermittelte Werte

kSP	214,8	kN/mm
-----	-------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

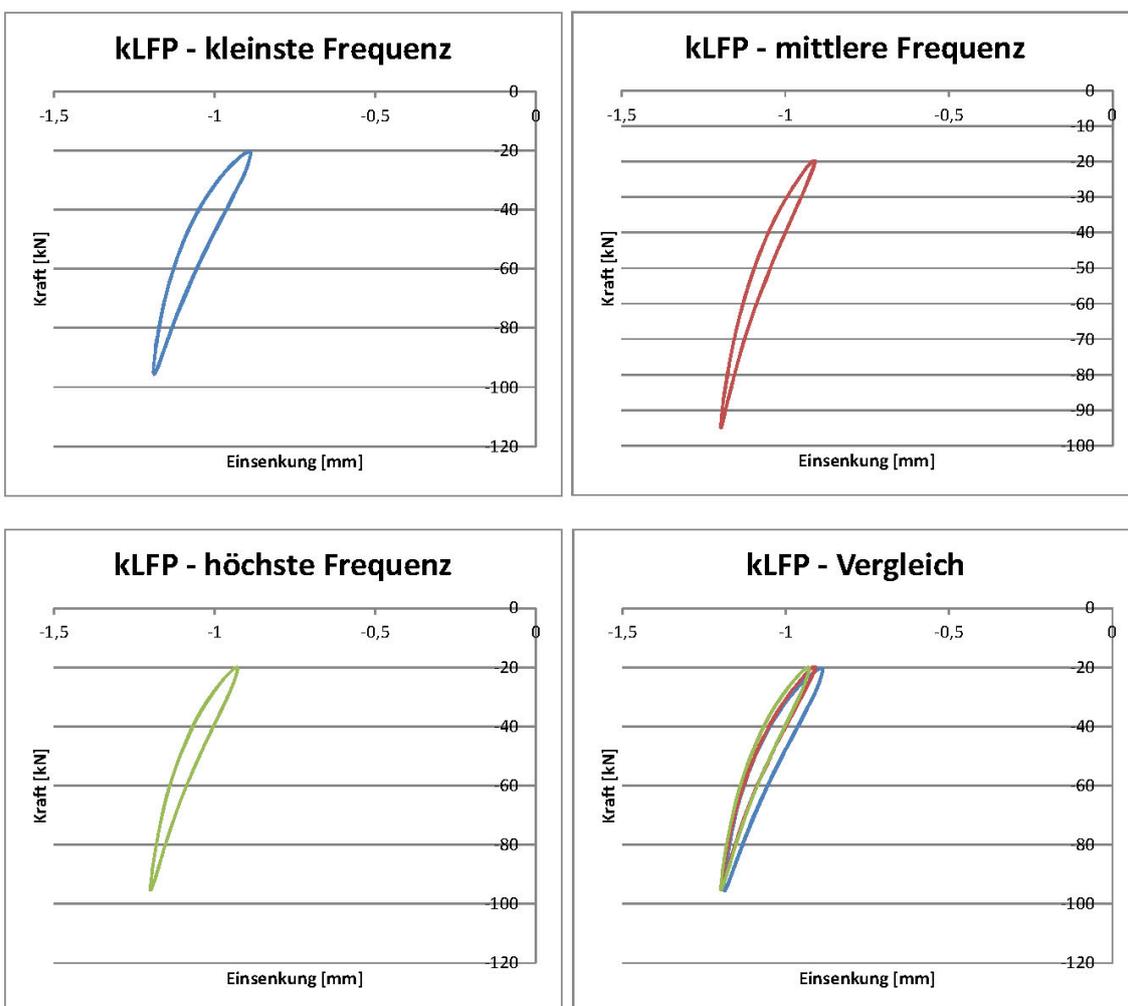
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	E
Prüfling	W12790
Probennummer	Probe4
Testlauf	12793

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	271,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	284,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	302,2	kN/mm

Diagramme

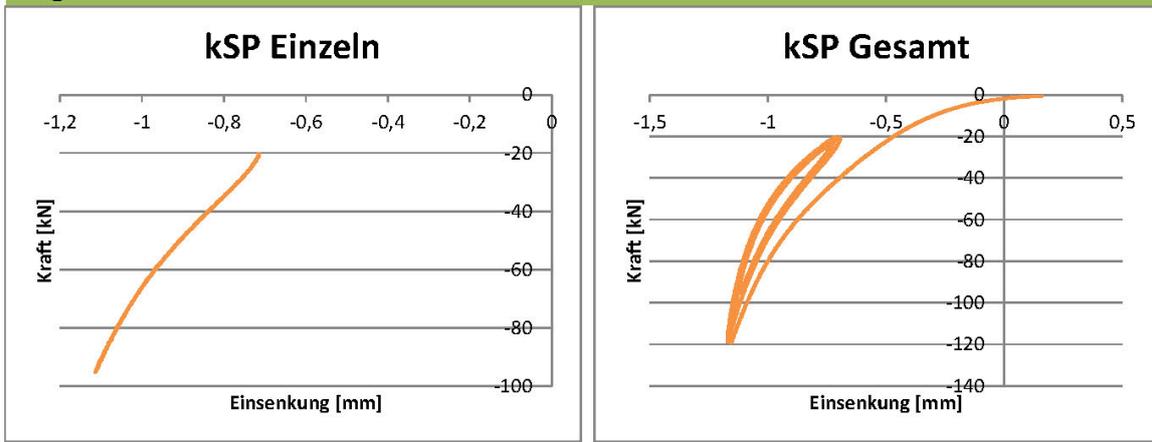


Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld	Datum der Messung	07.06.2013
Prüfnorm	EN 13146	Testlauf	Testlauf 5
Prüfkategorie	E		
Prüfling	W12790		
Probennummer	Probe5		

Ermittelte Werte

kSP	214,8	kN/mm
-----	-------	-------

Diagramme

Beschreibung des Testlaufs

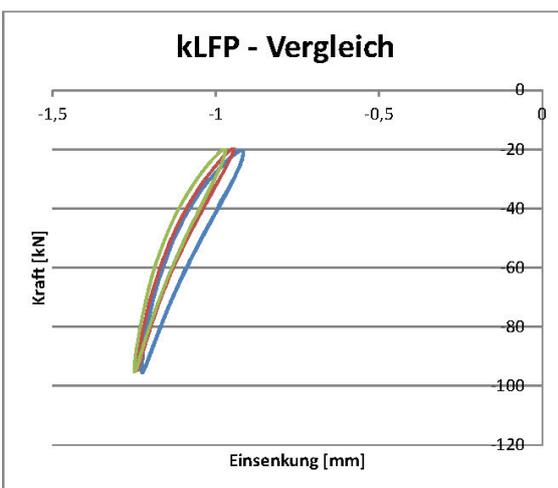
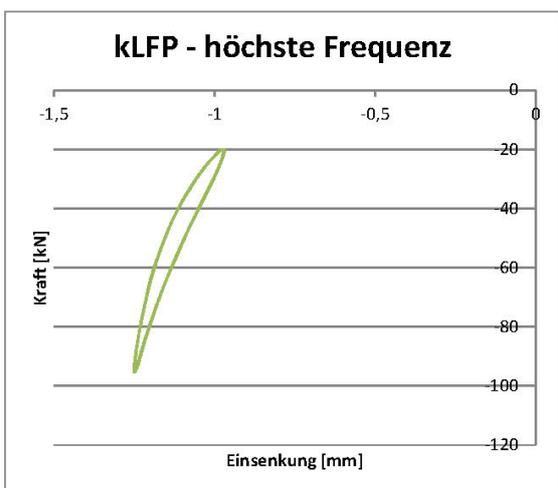
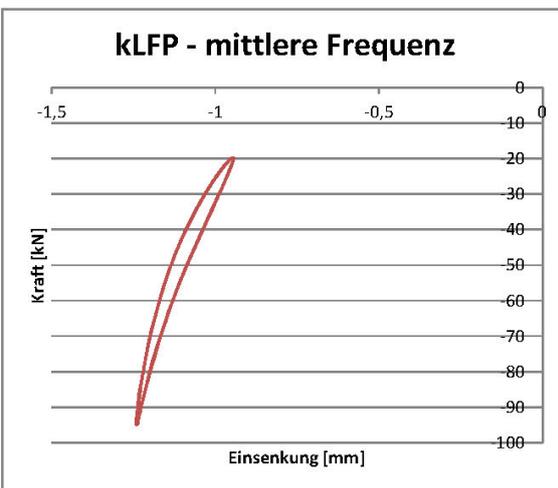
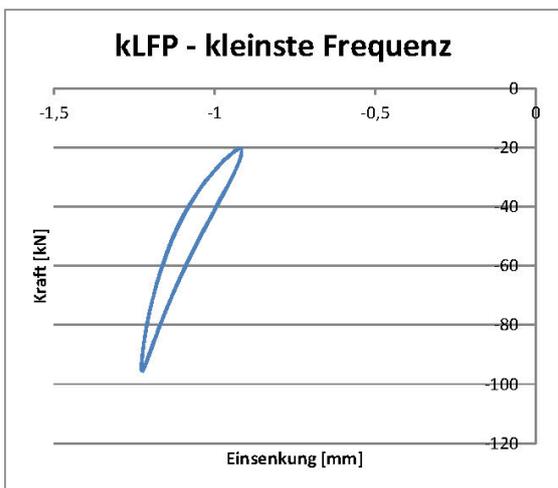
Datum der Messung	07.06.2013
Maschine	Prüffeld
Prüfnorm	EN 13146
Prüfkategorie	E
Prüfling	W12790
Probennummer	Probe5
Testlauf	12794

Prüffrequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz
Messverzögerung	0,005	s
Messrate	50	

Ermittelte Werte

kLFP - 5 Hz	272,7	kN/mm
kLFP - 10 Hz	285,9	kN/mm
kLFP - 20 Hz	304,6	kN/mm

Diagramme



ANHANG C2 – MESSDATENBLÄTTER MTS 322

Messdatenblätter

aus den Prüfungen der statischen
und dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten
an Schienenzwischenlagen
ermittelt an der MTS 322

Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW700
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	26

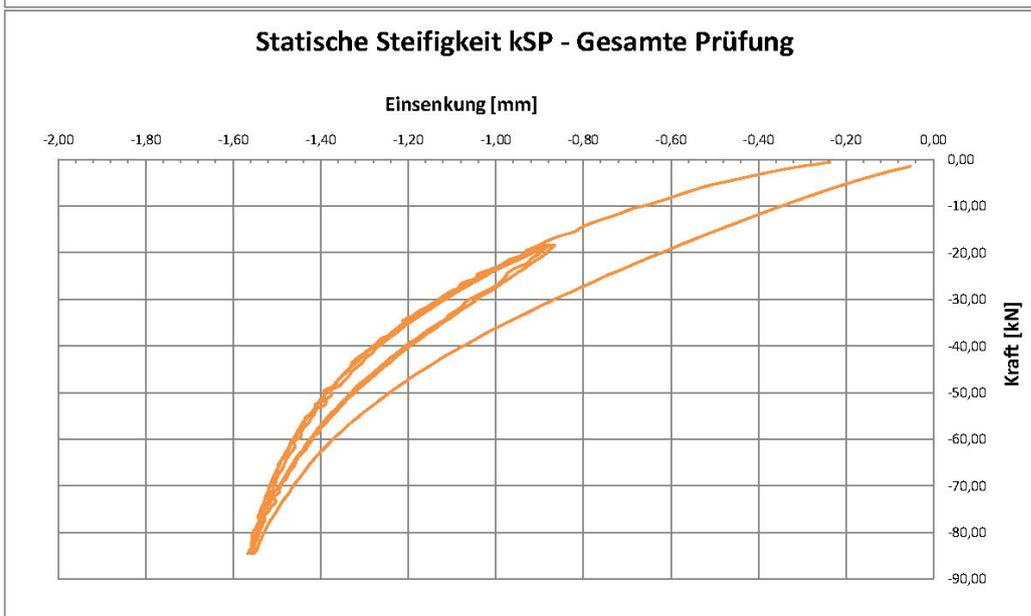
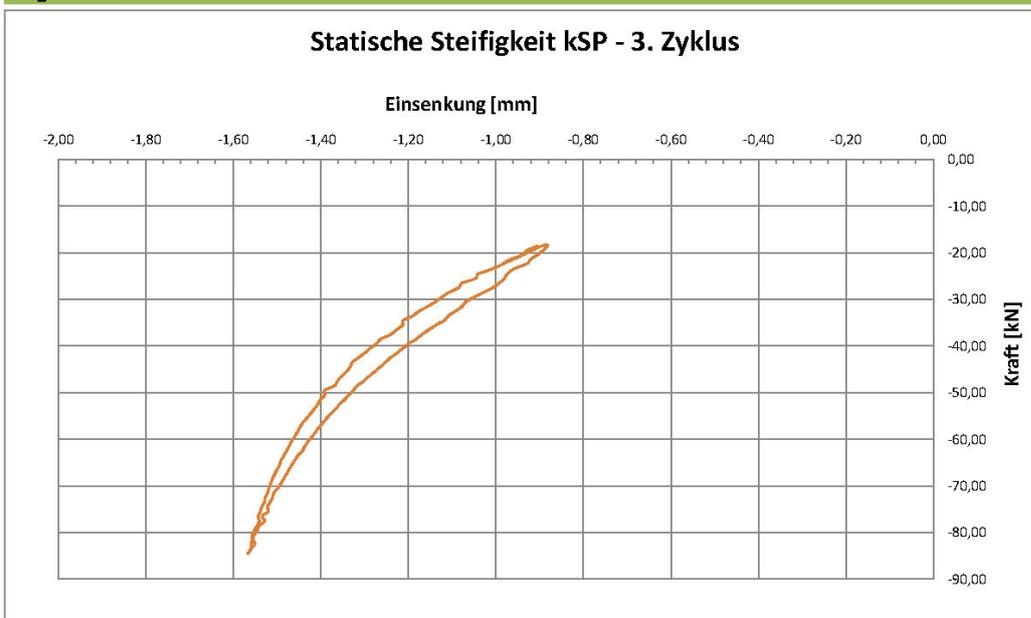
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	83,0	kN/mm
kLFP - 5 Hz	90,1	kN/mm
kLFP - 10 Hz	90,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	91,2	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

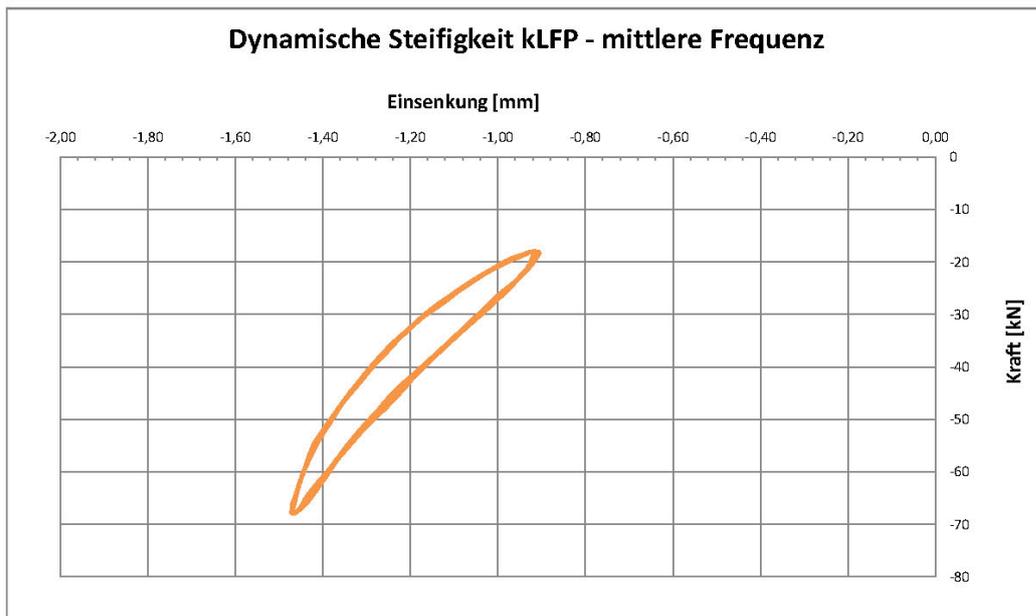
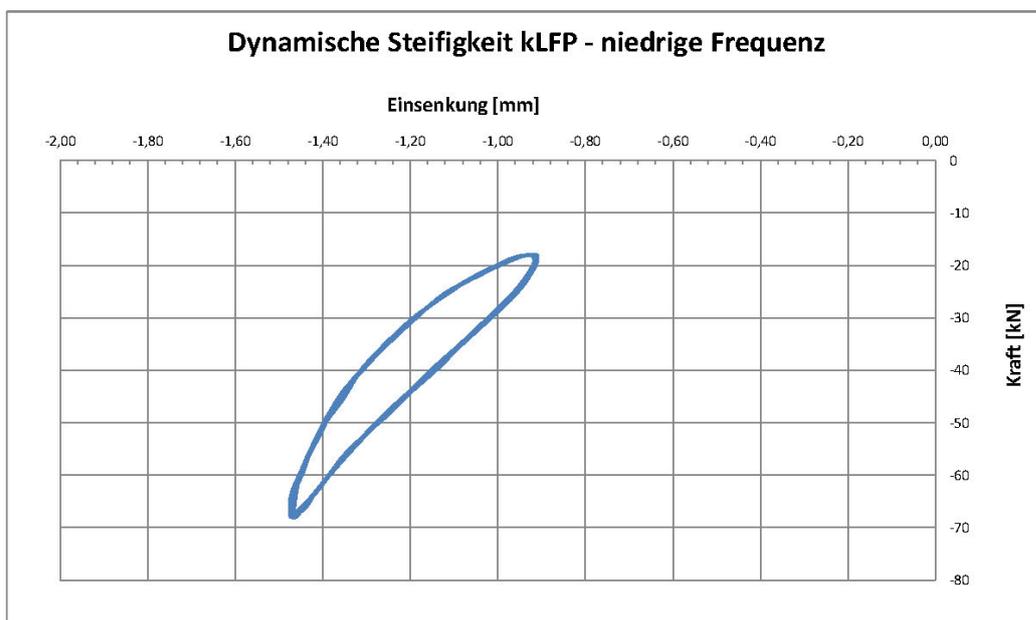
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW700
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	83,0	kN/mm
kLFP - 5 Hz	90,1	kN/mm
kLFP - 10 Hz	90,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	91,2	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

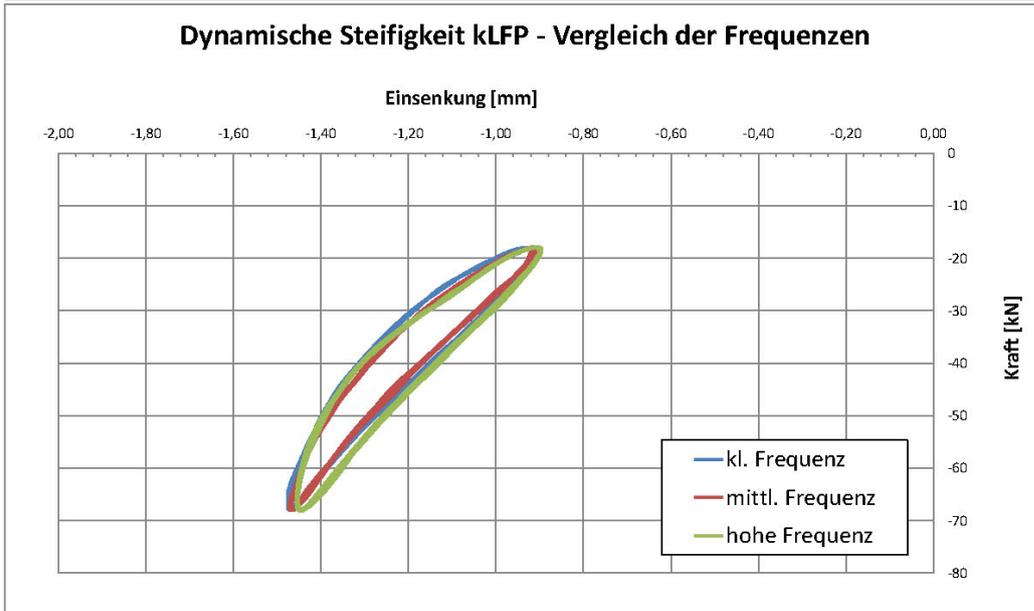
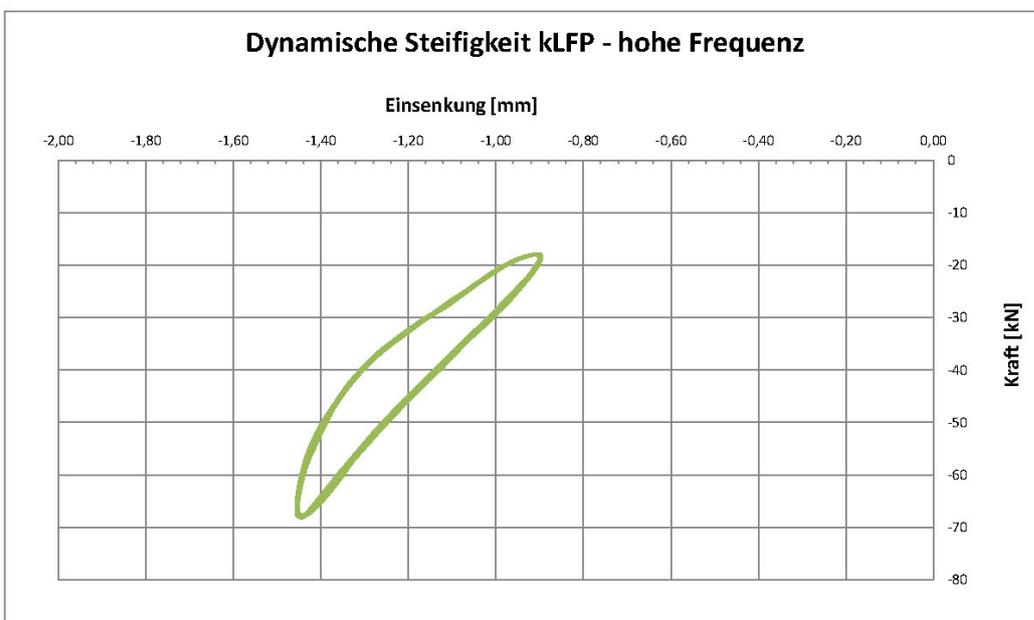
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW700
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	83,0	kN/mm
kLFP - 5 Hz	90,1	kN/mm
kLFP - 10 Hz	90,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	91,2	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W15126
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

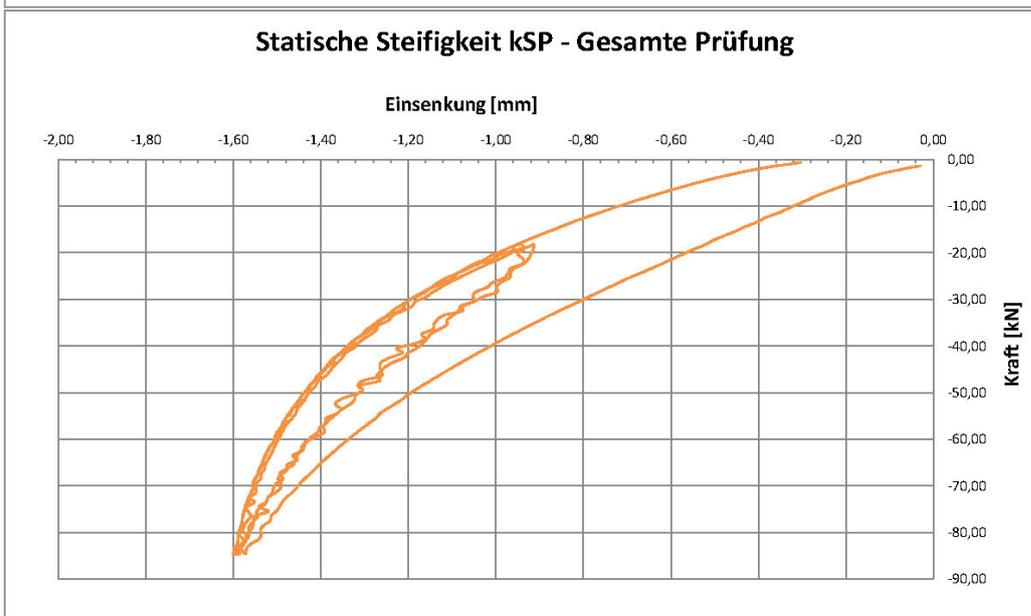
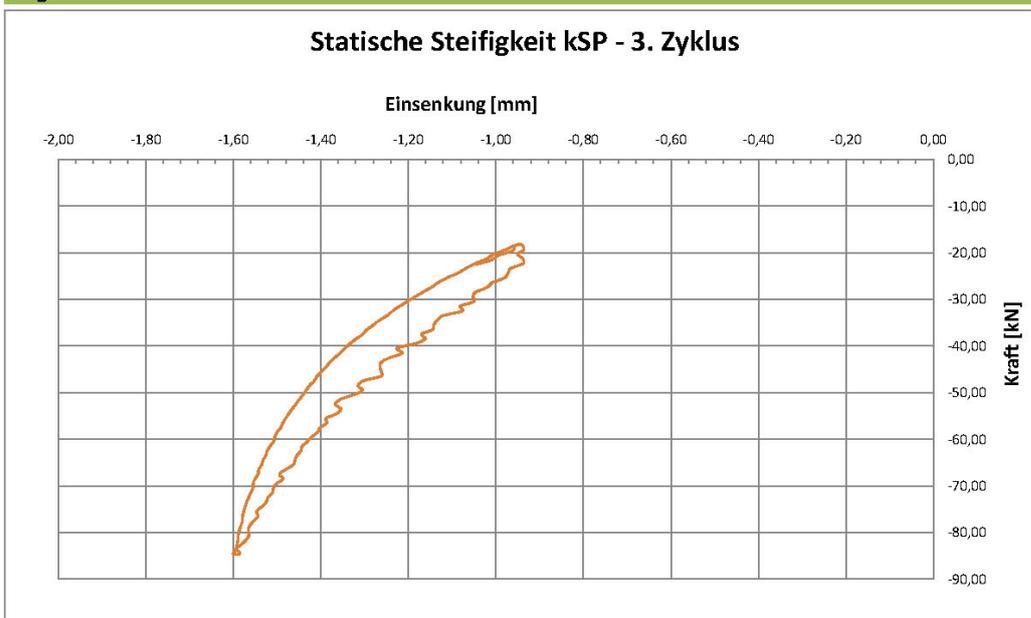
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	91,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	122,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	125,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	132,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

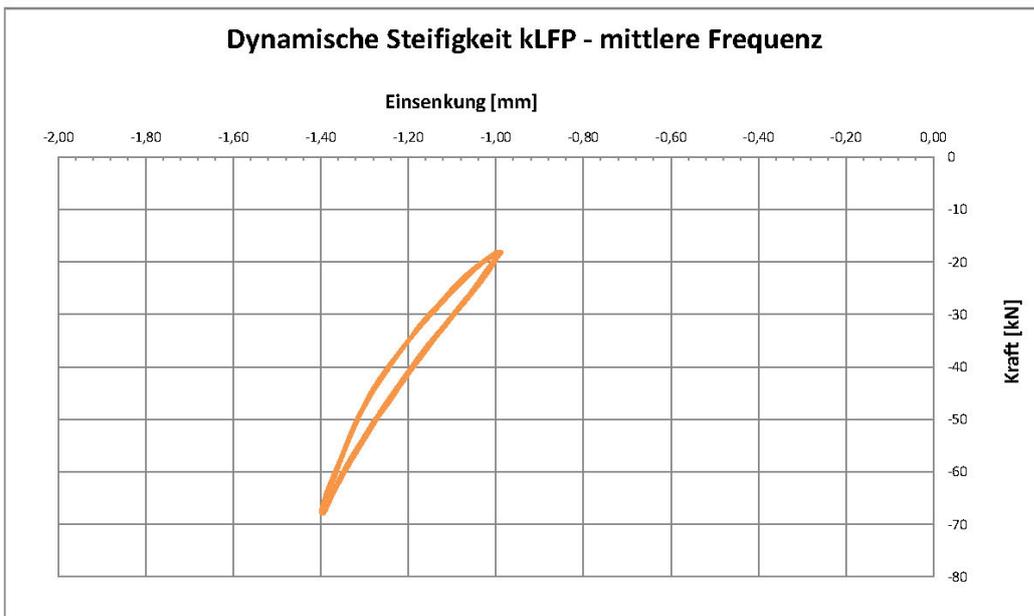
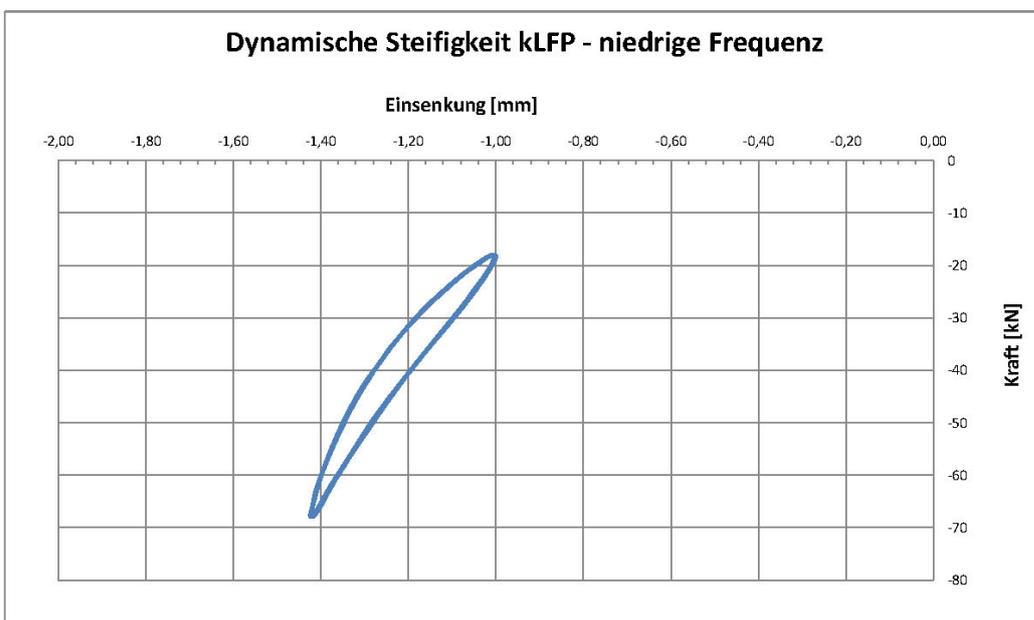
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W15126
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	91,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	122,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	125,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	132,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

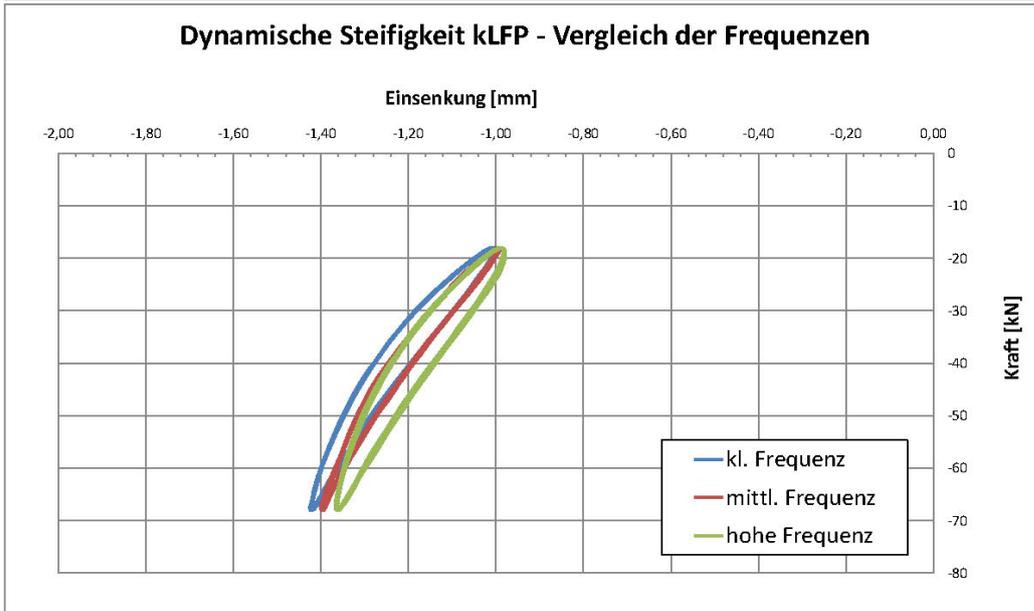
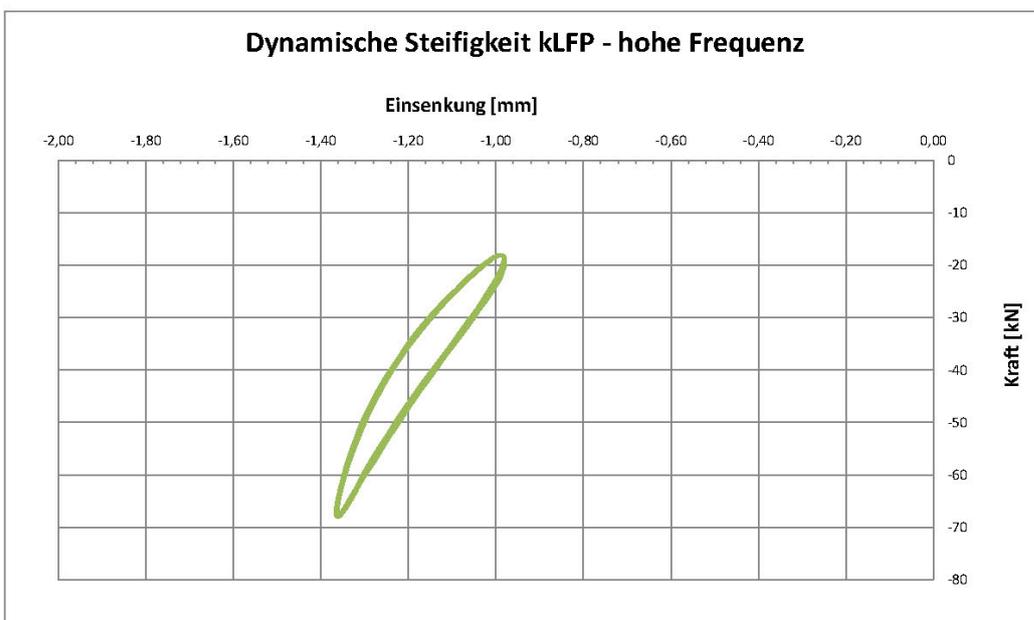
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W15126
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	91,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	122,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	125,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	132,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W15127
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

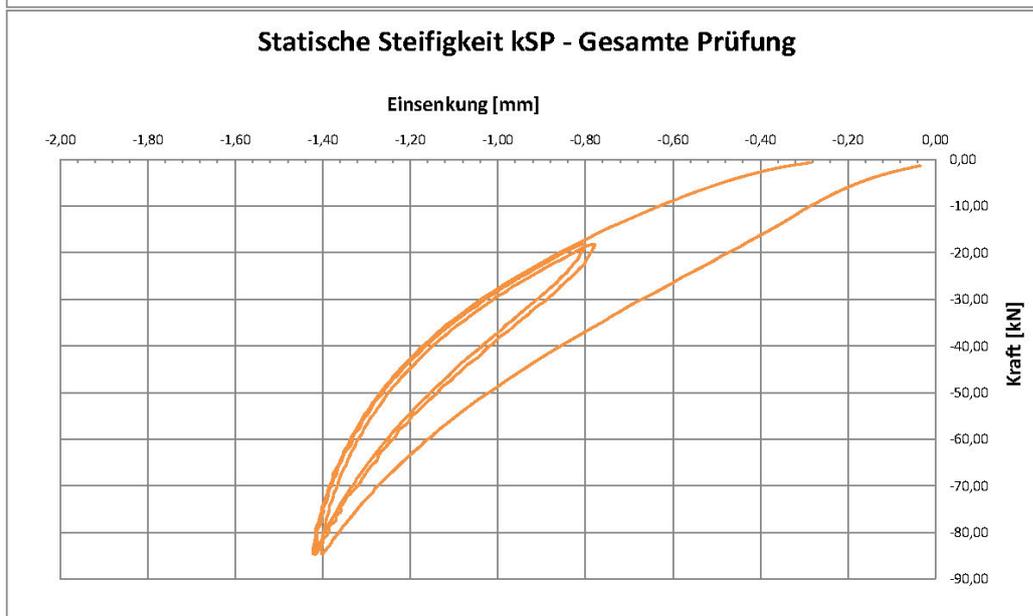
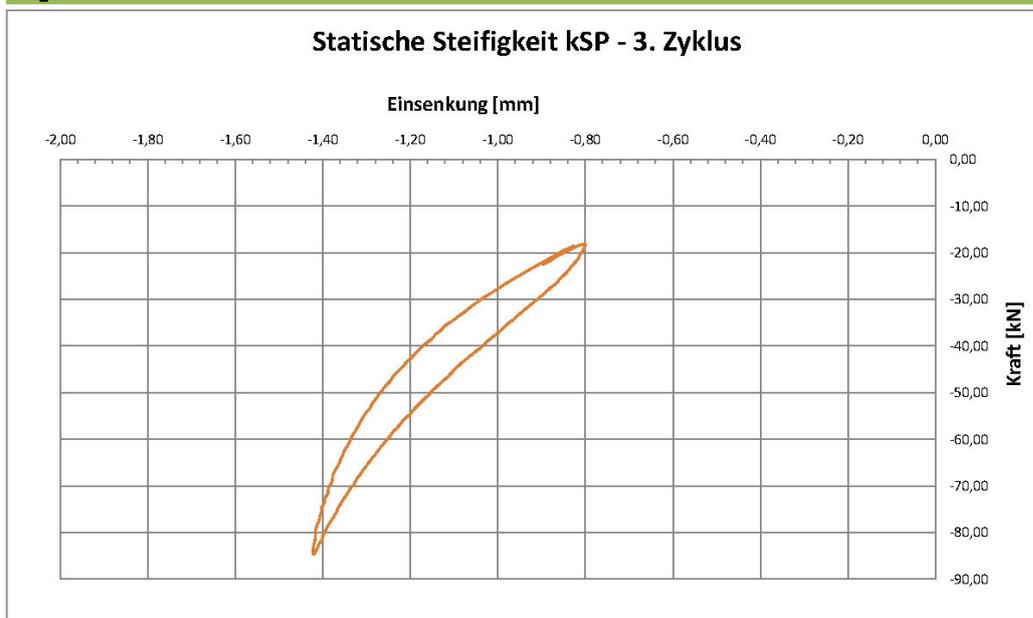
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	95,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	132,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	138,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	145,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

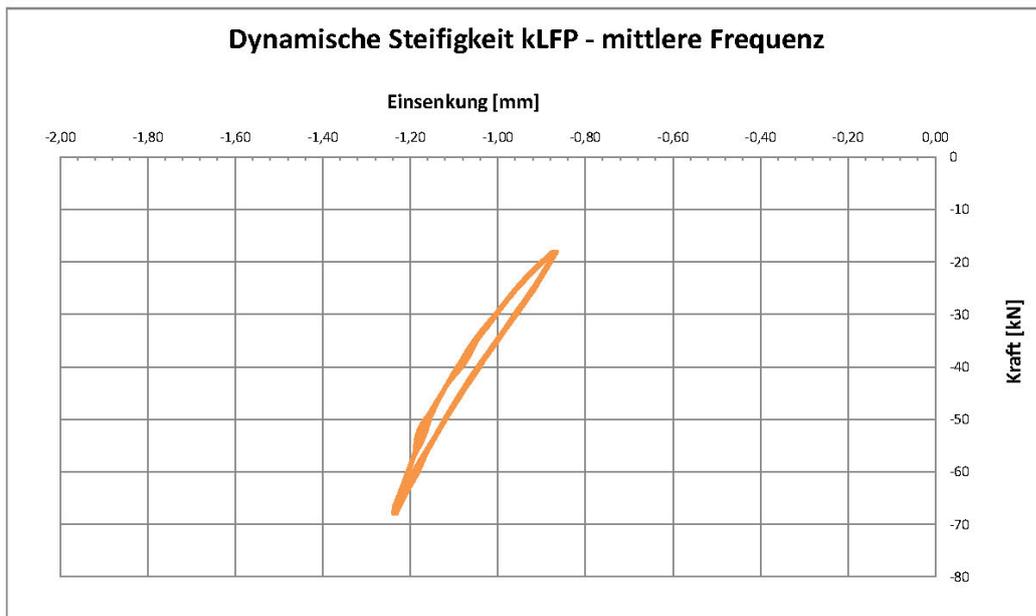
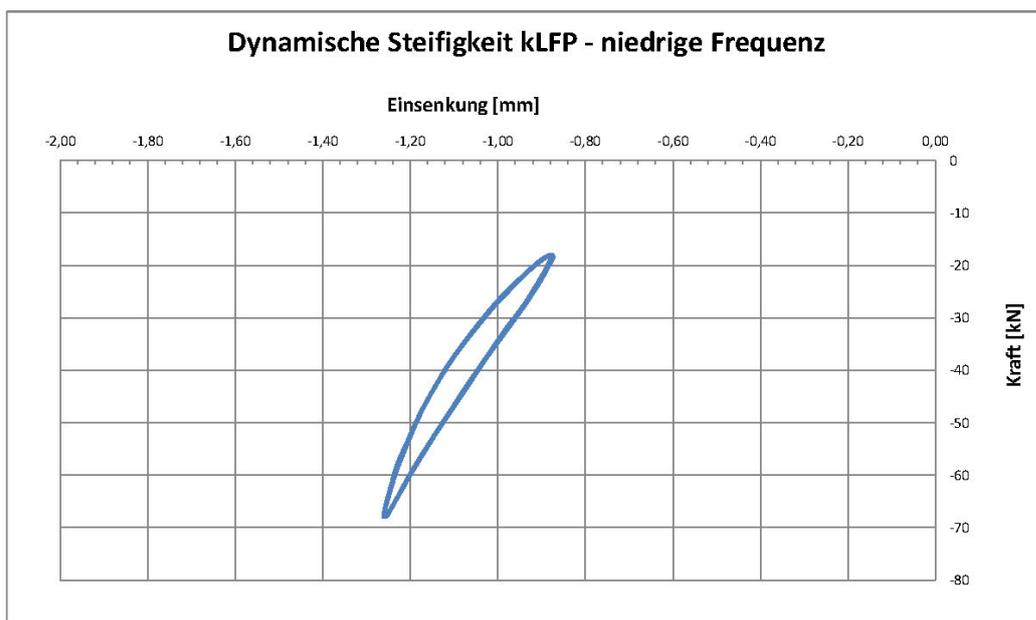
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W15127
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	95,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	132,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	138,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	145,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

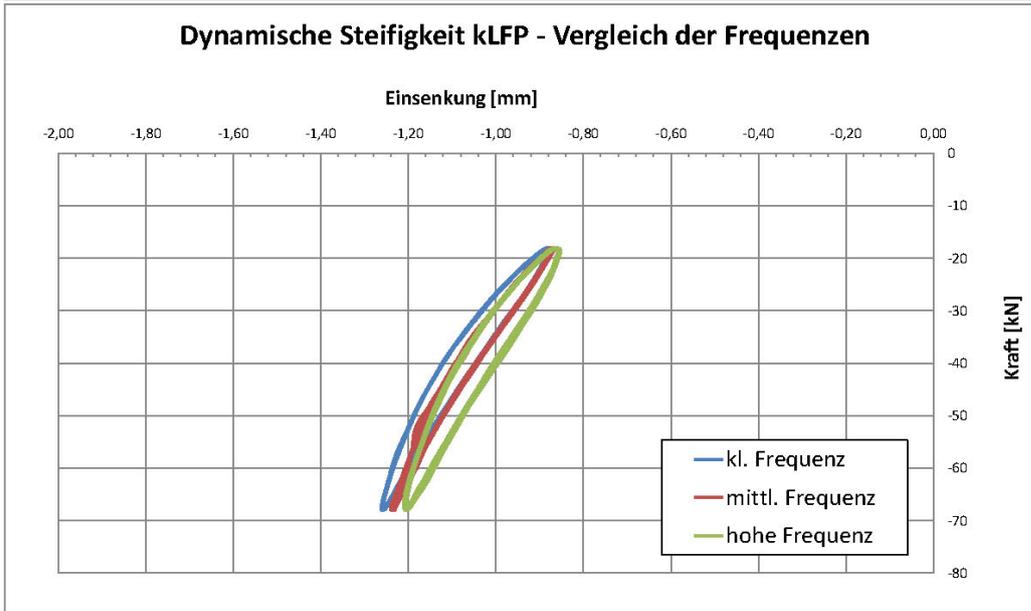
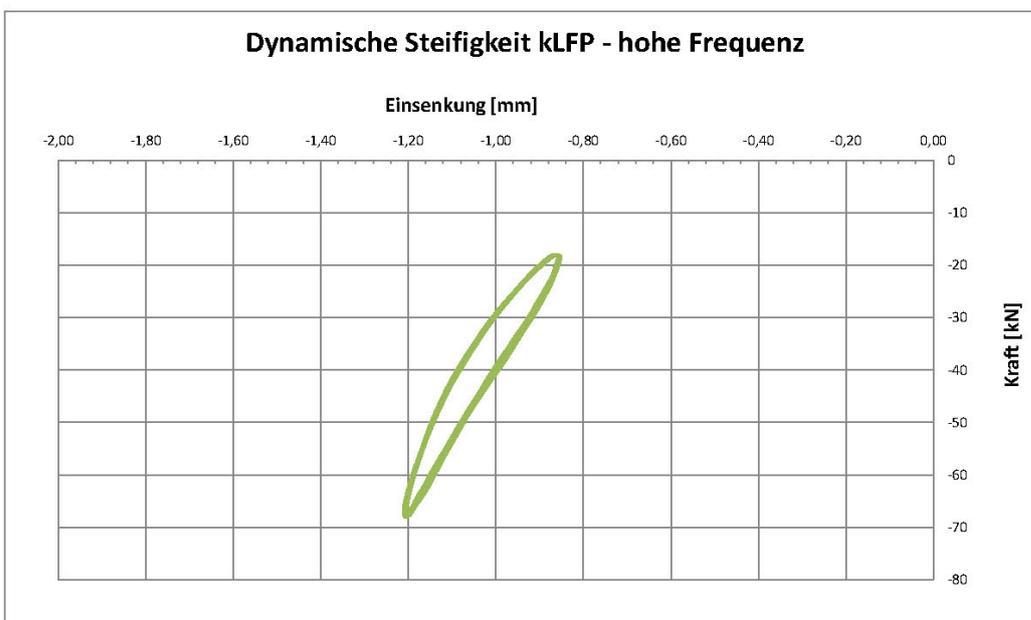
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W15127
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	95,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	132,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	138,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	145,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

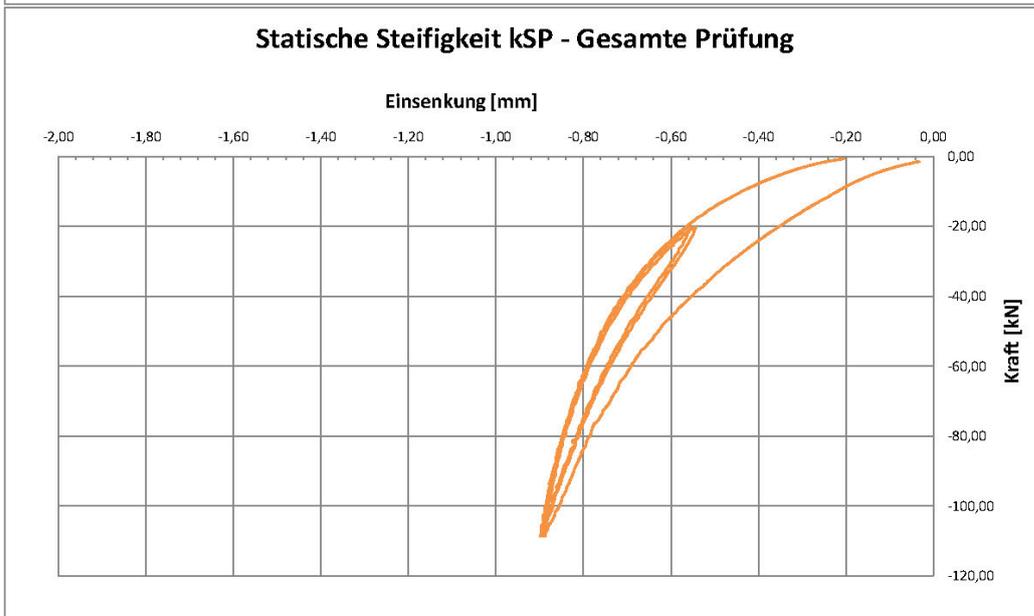
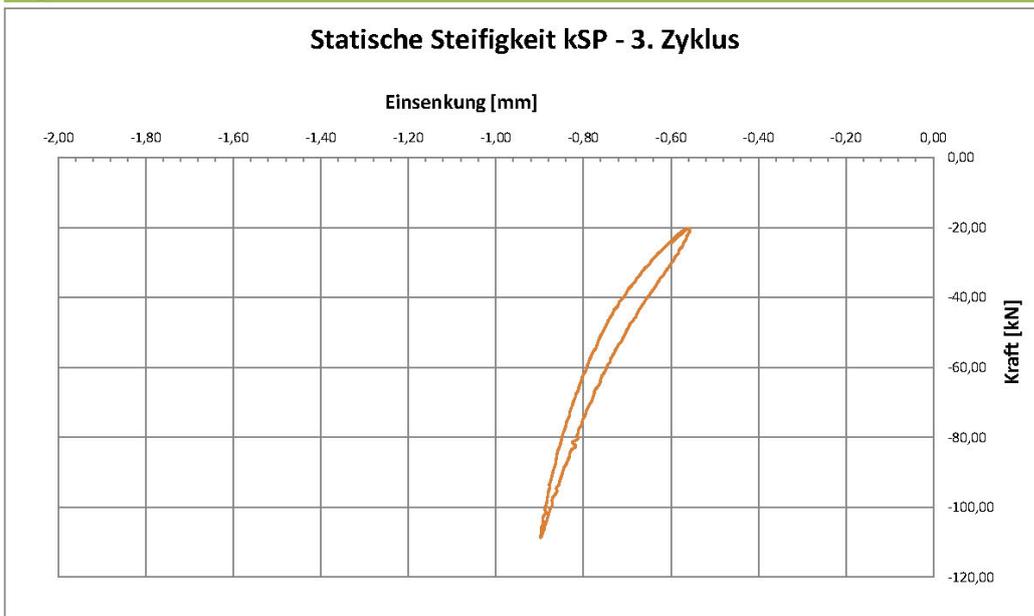
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W12790
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	20,0	kN
Fmax	95,2	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	248,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	310,7	kN/mm
kLFP - 10 Hz	314,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	333,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

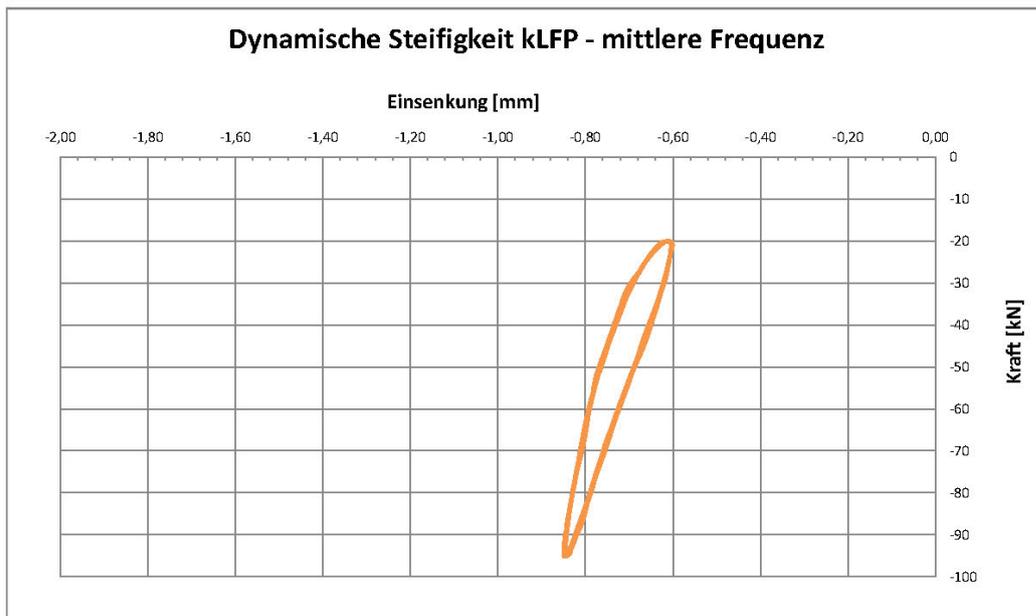
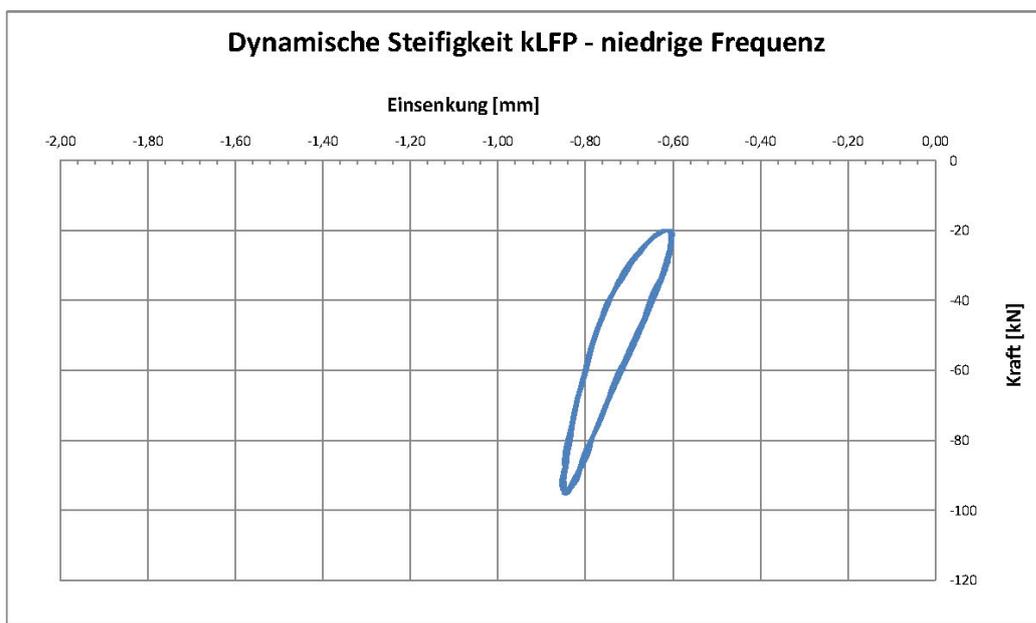
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W12790
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	20,0	kN
Fmax	95,2	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	248,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	310,7	kN/mm
kLFP - 10 Hz	314,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	333,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

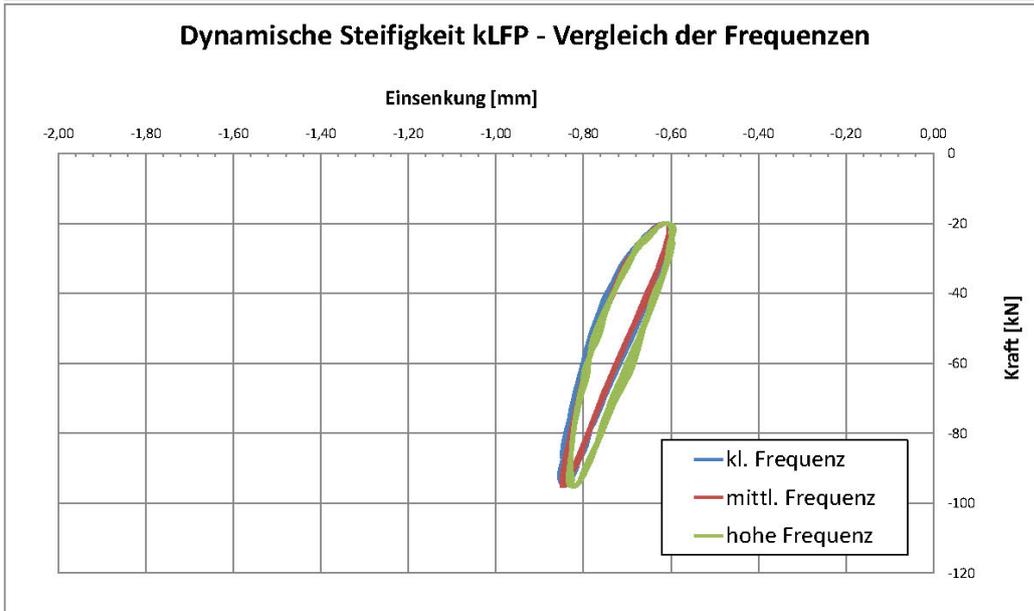
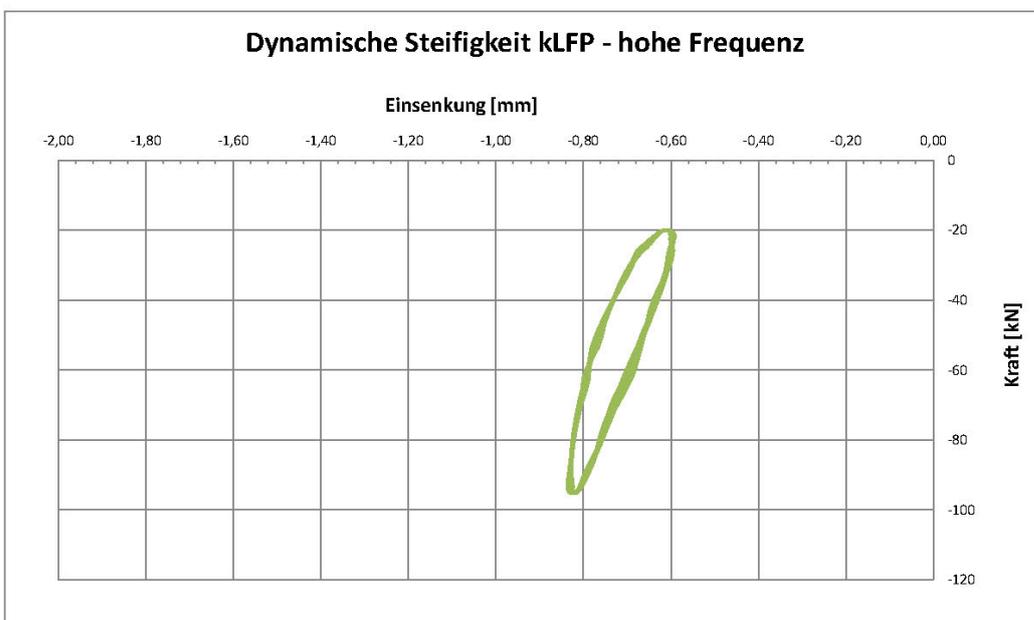
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	W12790
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	20,0	kN
Fmax	95,2	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	248,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	310,7	kN/mm
kLFP - 10 Hz	314,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	333,0	kN/mm

Diagramme



ANHANG C3 – MESSDATENBLÄTTER PRÜFFELD - VERGLEICH

Messdatenblätter

aus den Vergleichsmessungen der statischen
und dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten
an Schienenzwischenlagen
ermittelt am Bauteilprüffeld

Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	900
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_1
Messwerte / Zyklus	50

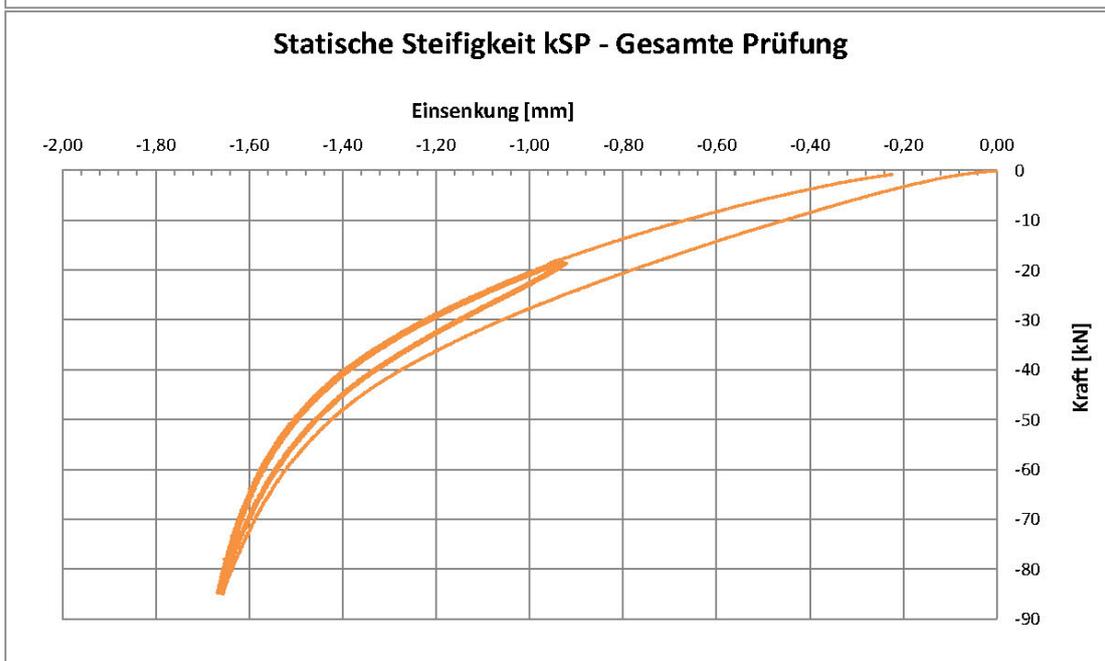
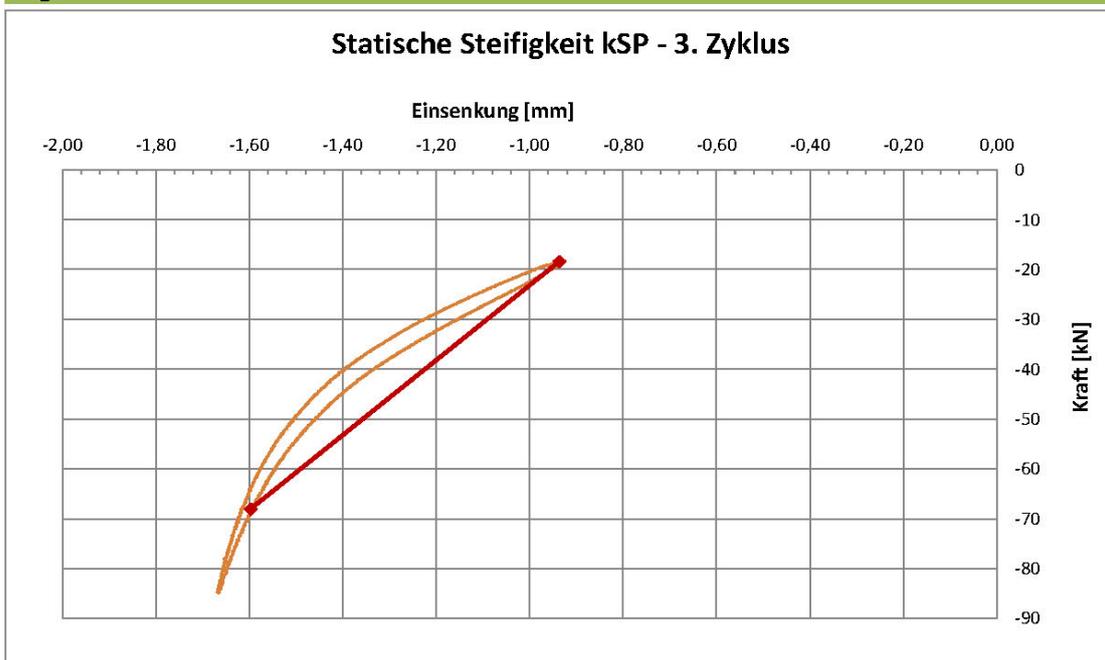
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,4	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	83,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

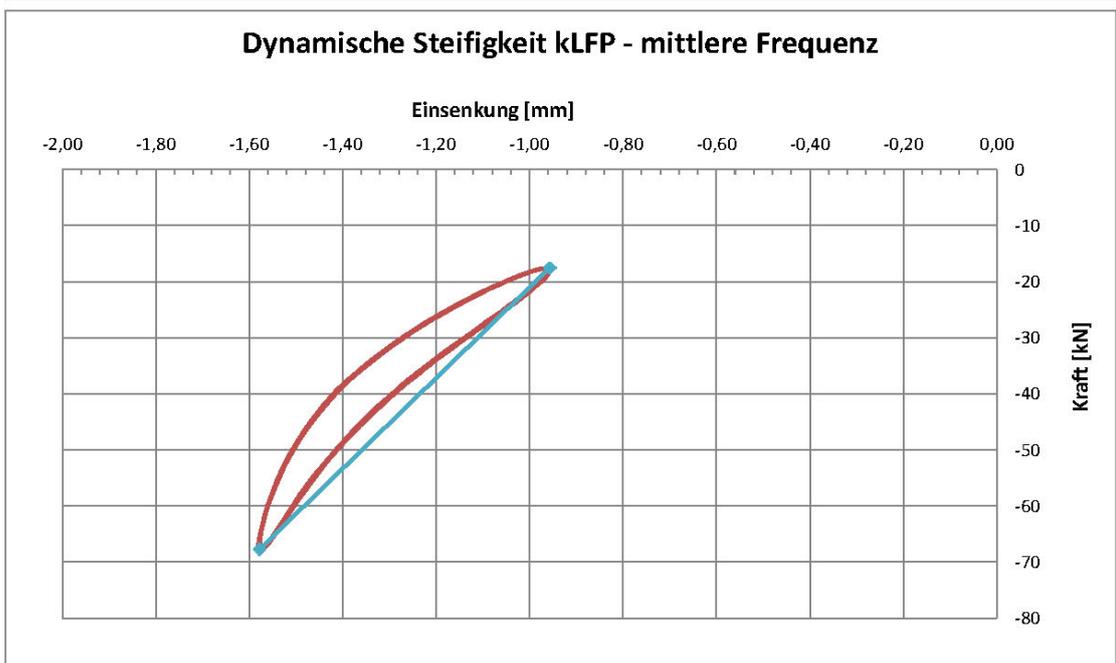
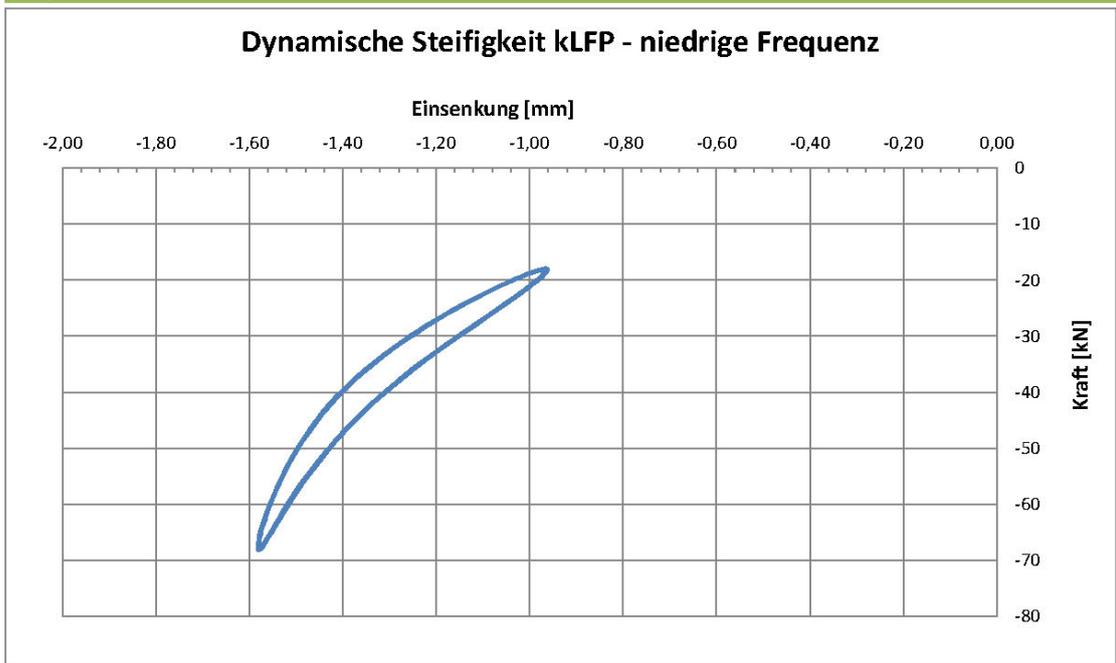
Maschine	Prüffeld
Testlauf	900
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_1
Messwerte / Zyklus	50

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,4	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	83,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	900
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_1
Messwerte / Zyklus	50

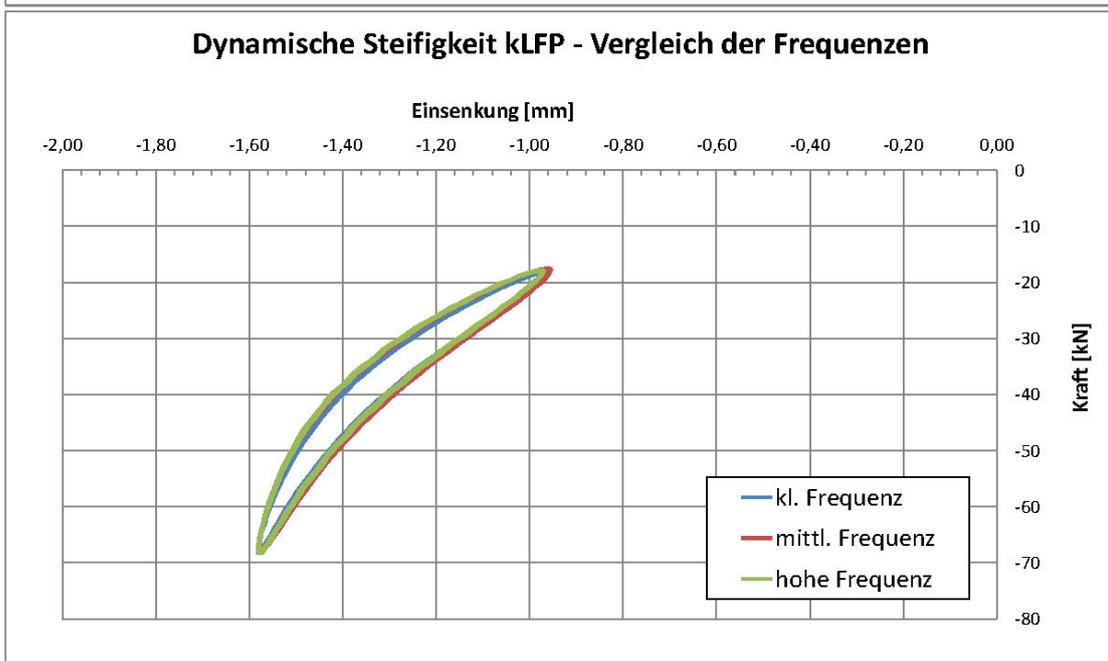
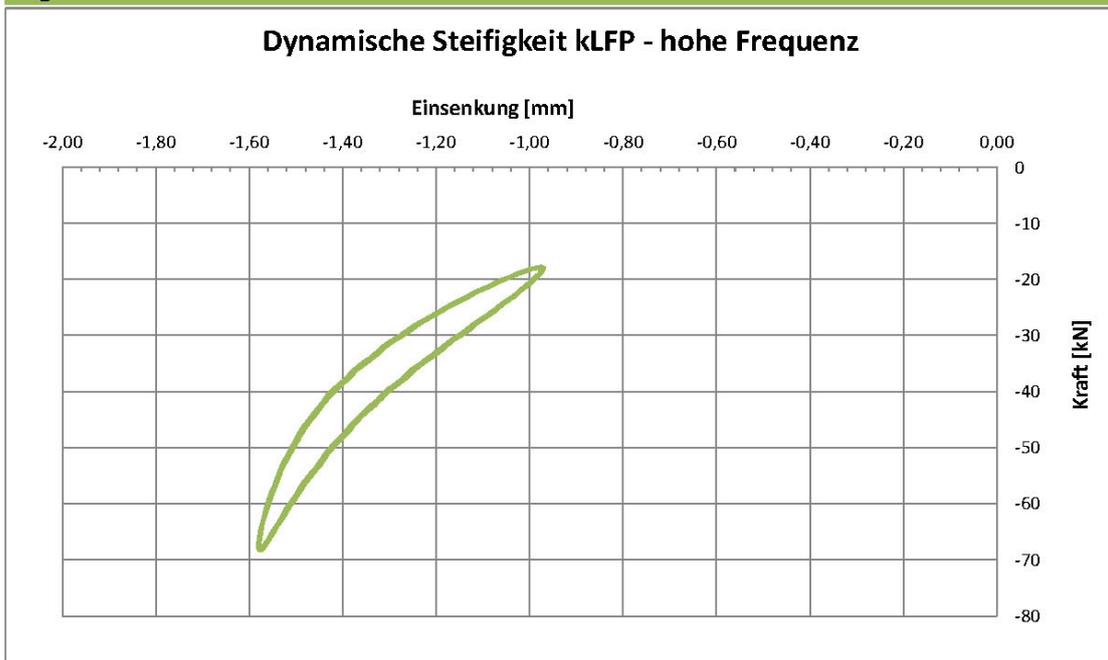
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,4	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	83,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüfstand
Testlauf	901
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_2
Messwerte / Zyklus	50

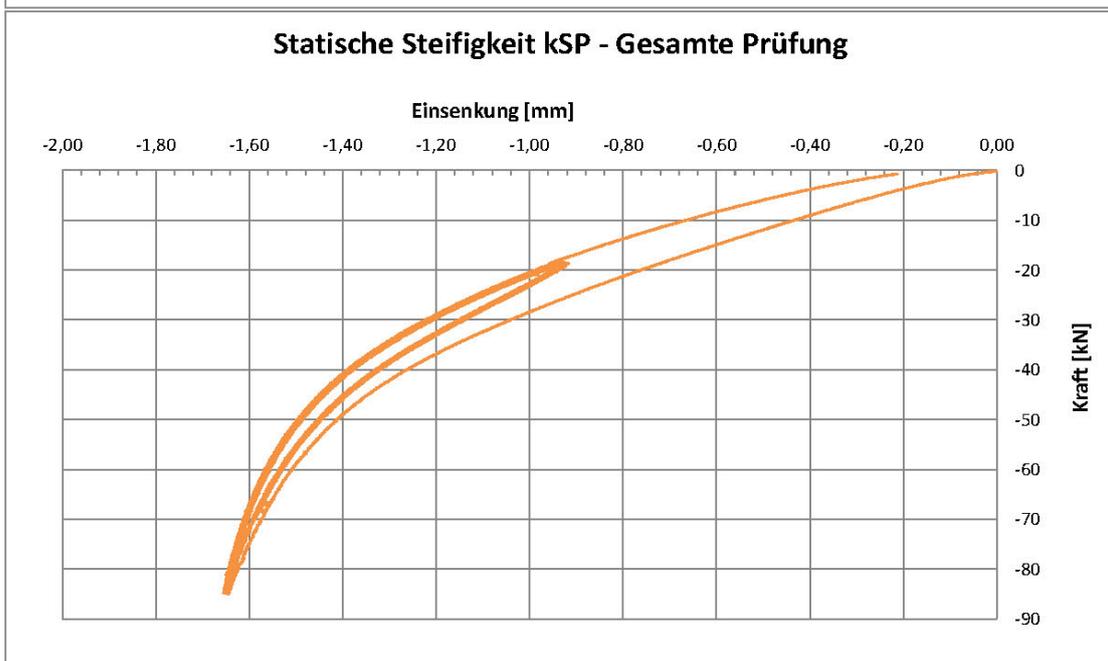
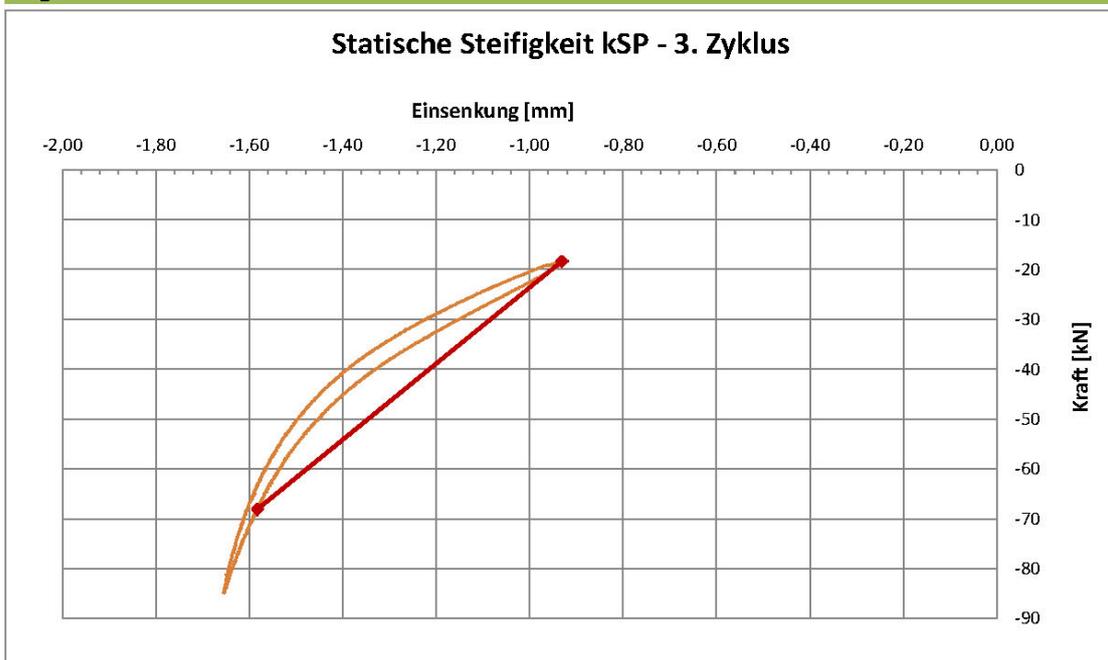
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	76,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	901
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_2
Messwerte / Zyklus	50

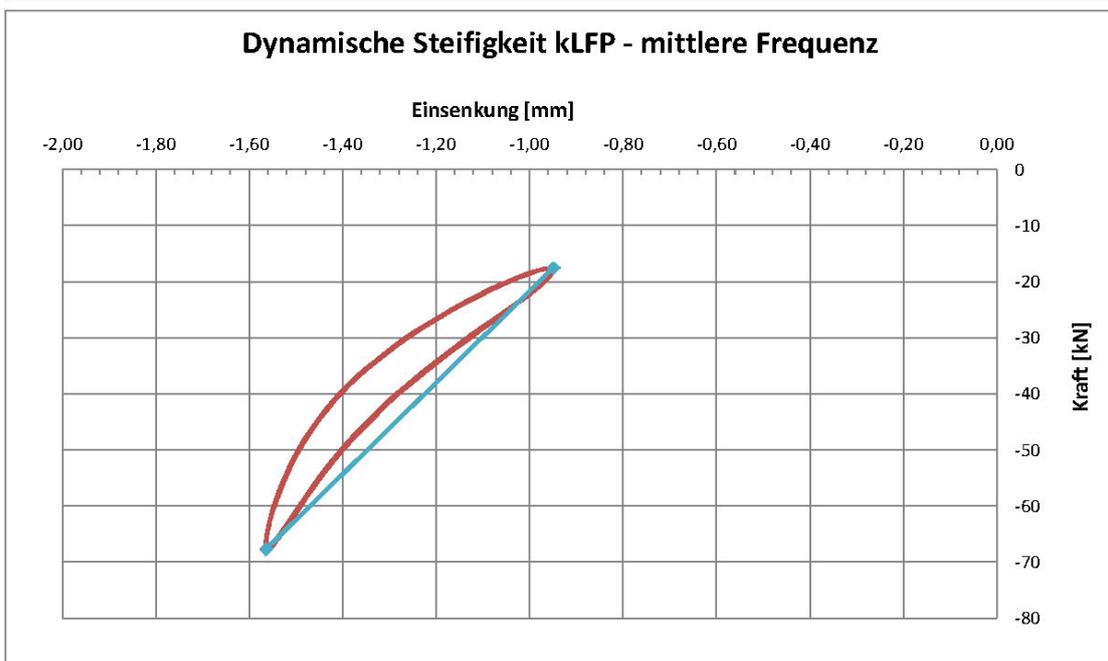
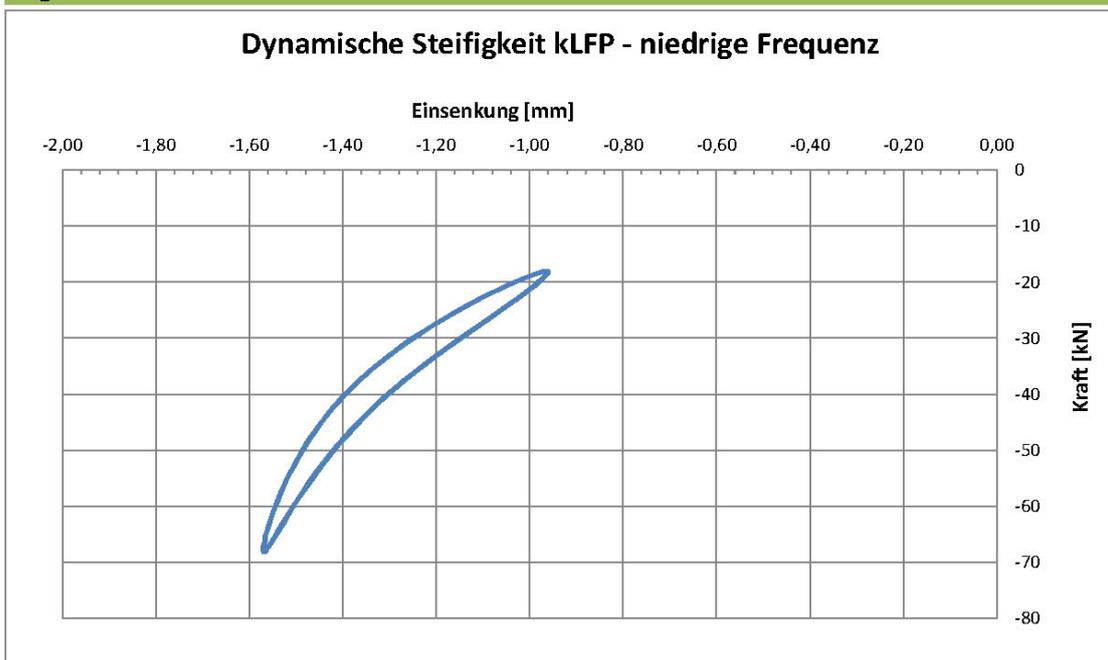
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	76,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	901
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_2
Messwerte / Zyklus	50

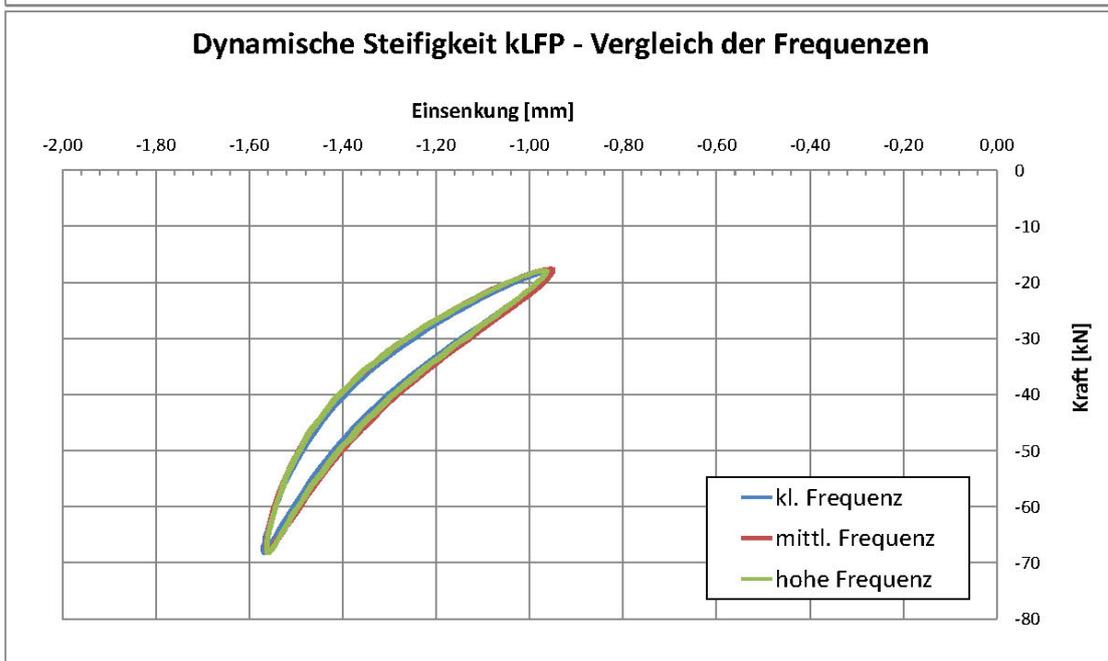
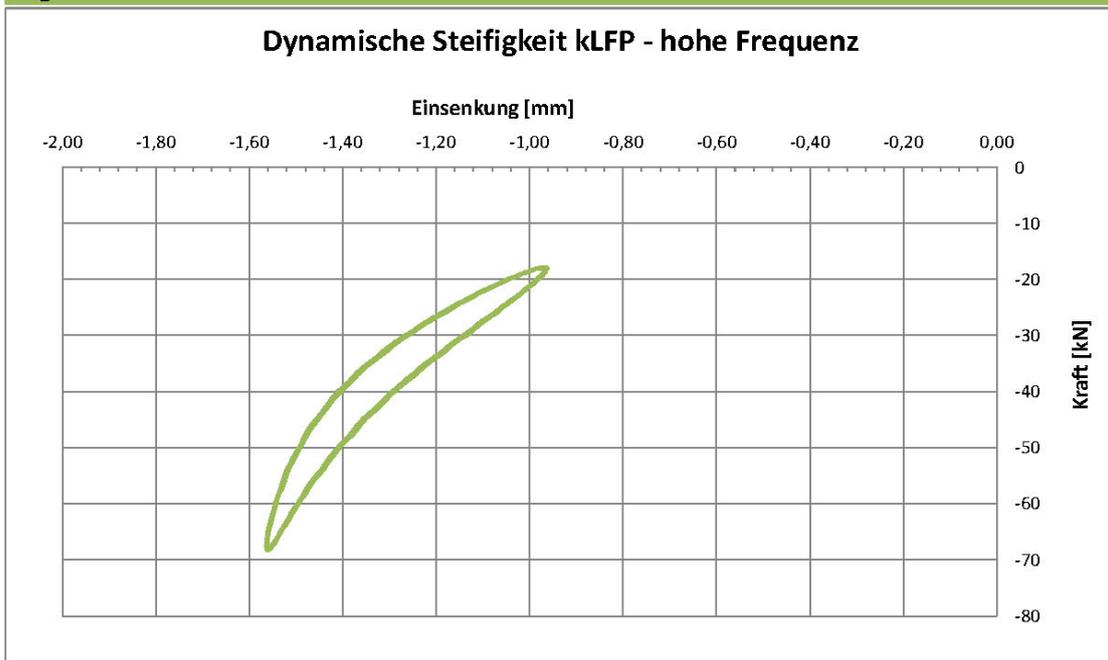
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	76,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüfstand
Testlauf	909
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_3
Messwerte / Zyklus	50

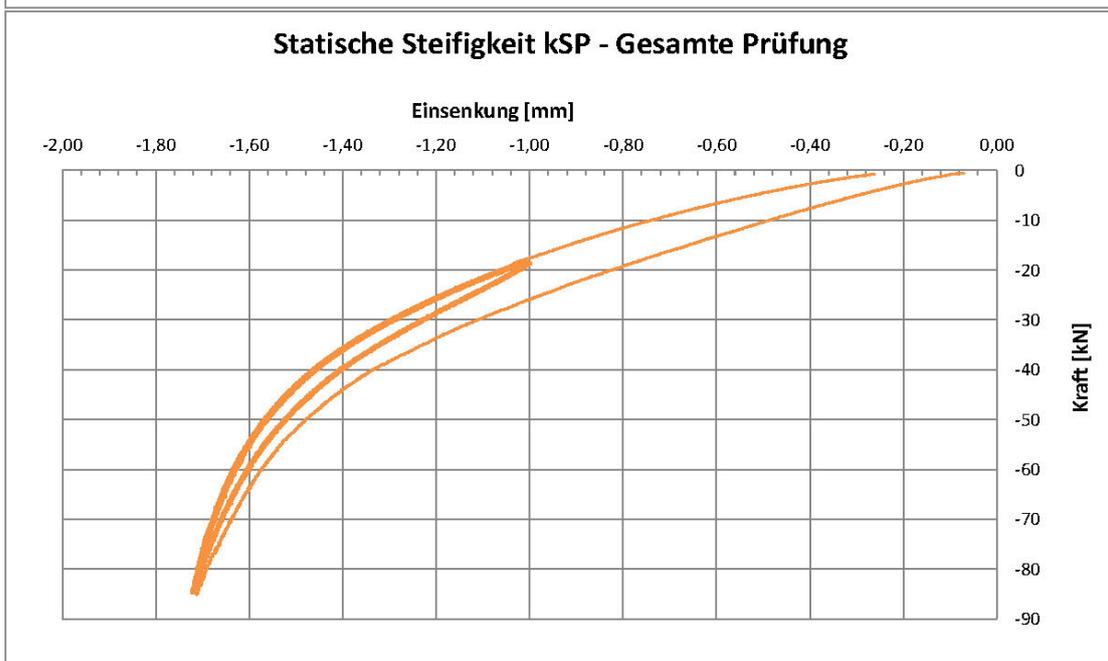
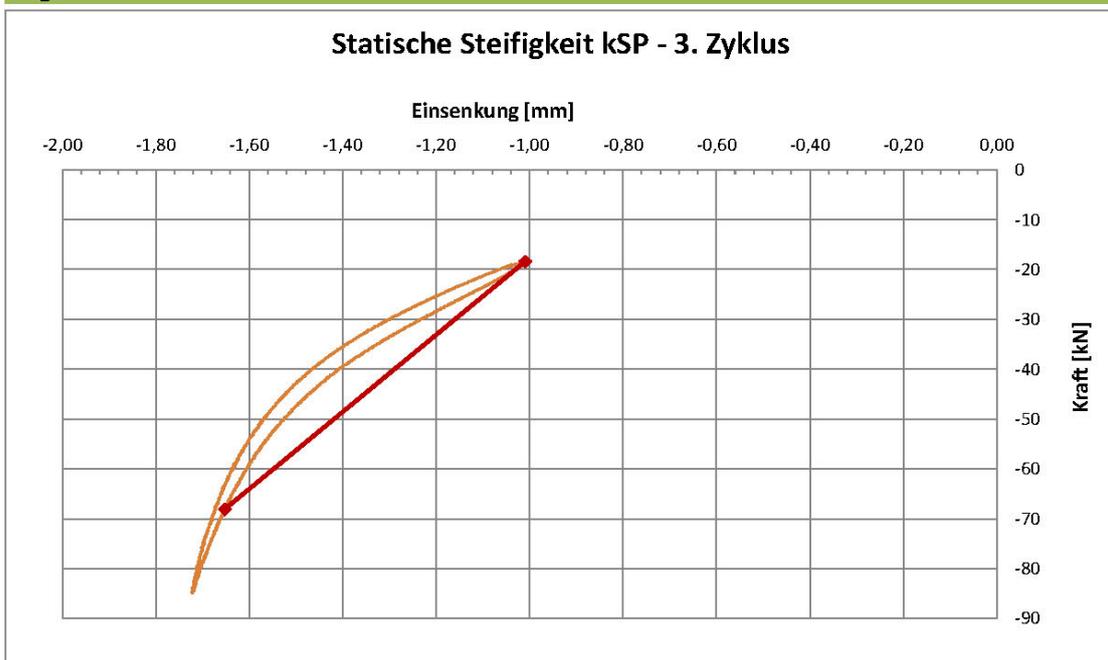
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	77,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	83,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	909
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_3
Messwerte / Zyklus	50

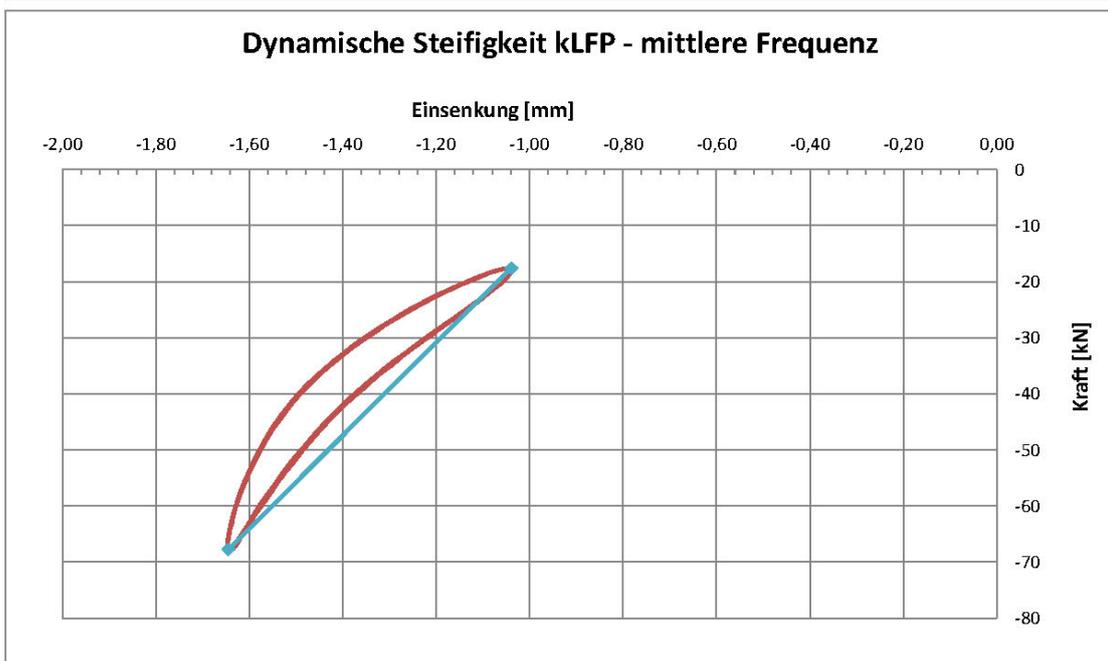
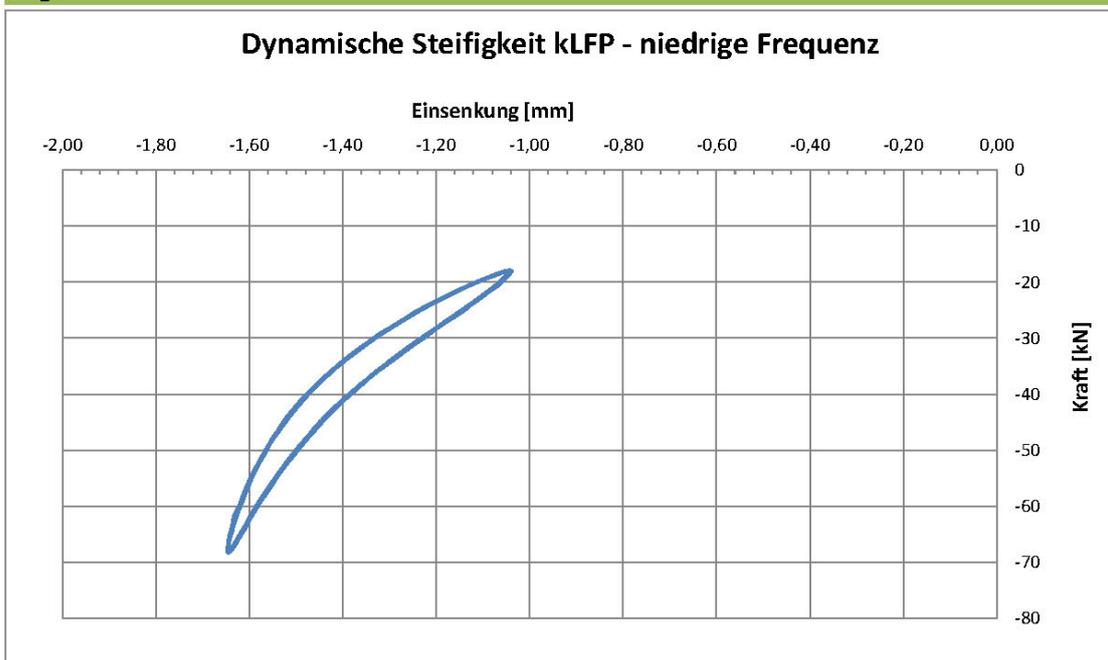
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	77,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	83,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	909
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_3
Messwerte / Zyklus	50

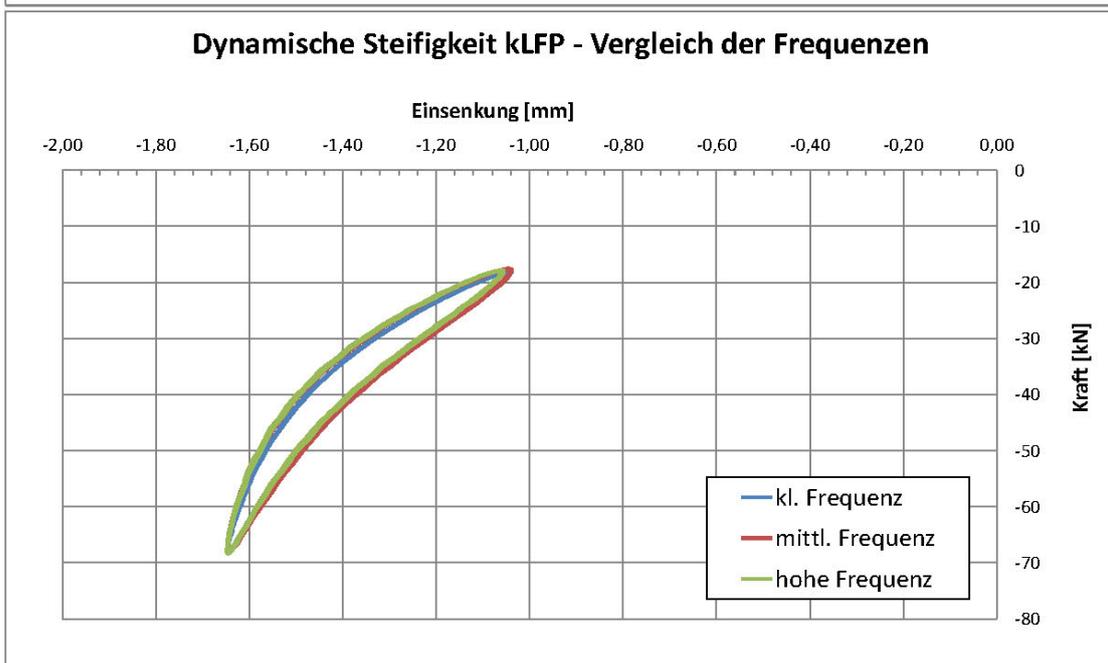
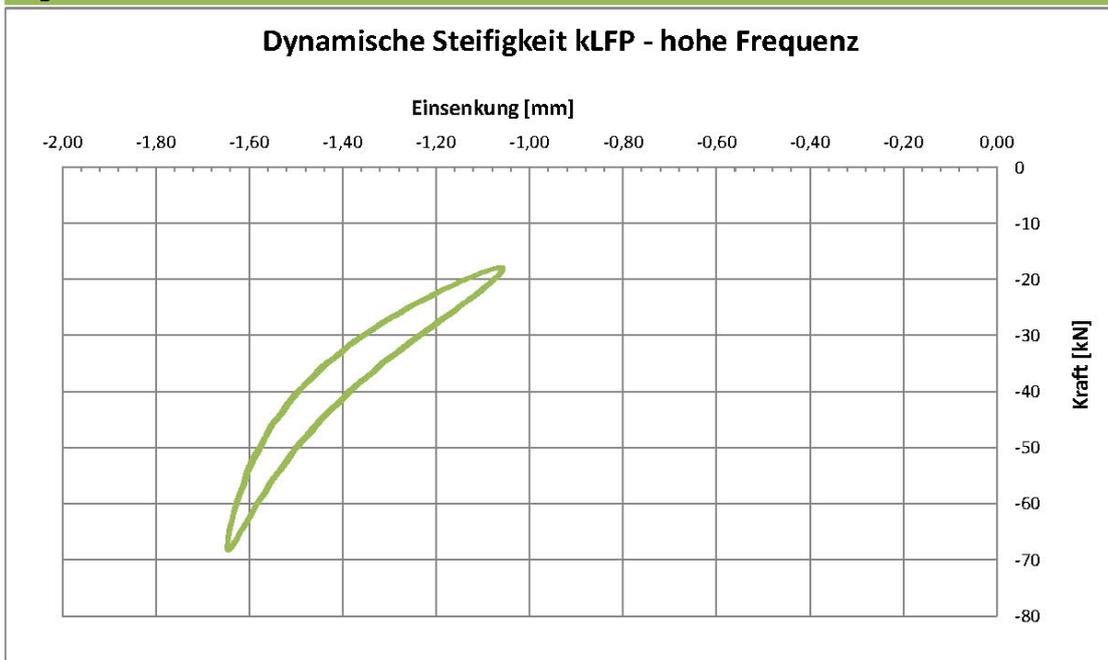
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	77,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	83,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,2	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	902
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	50

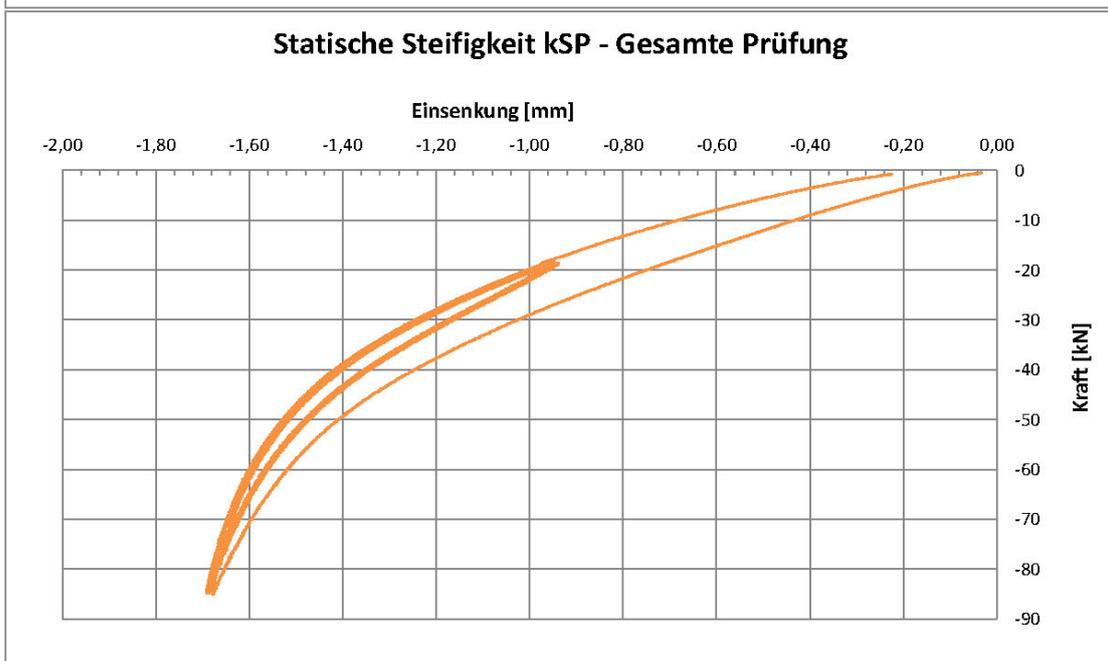
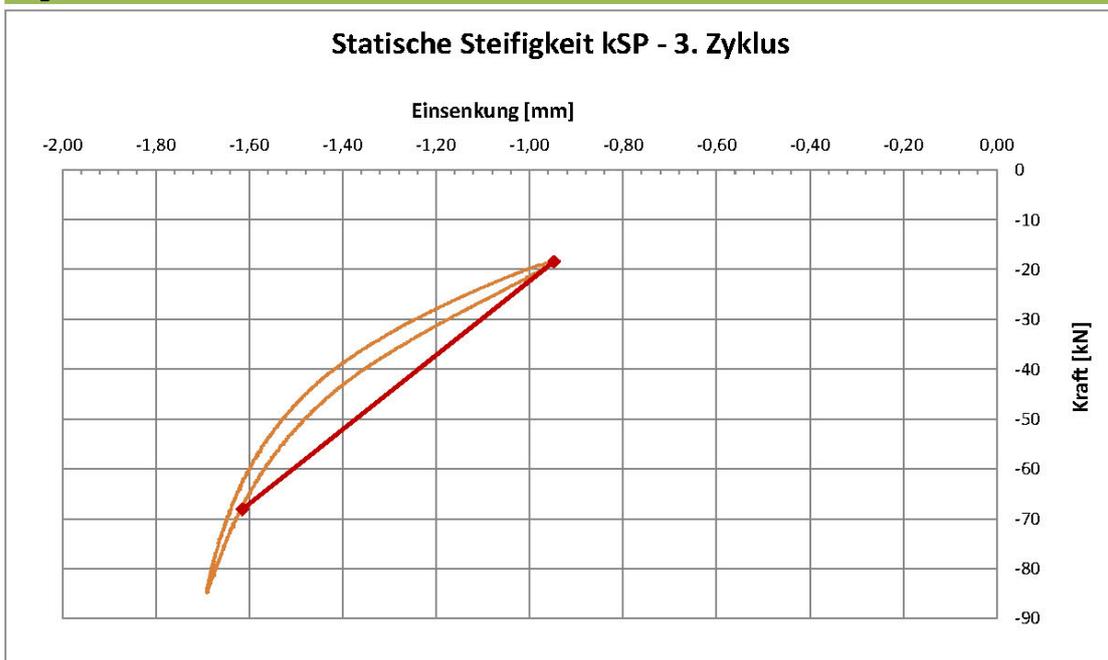
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	74,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	81,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	902
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	50

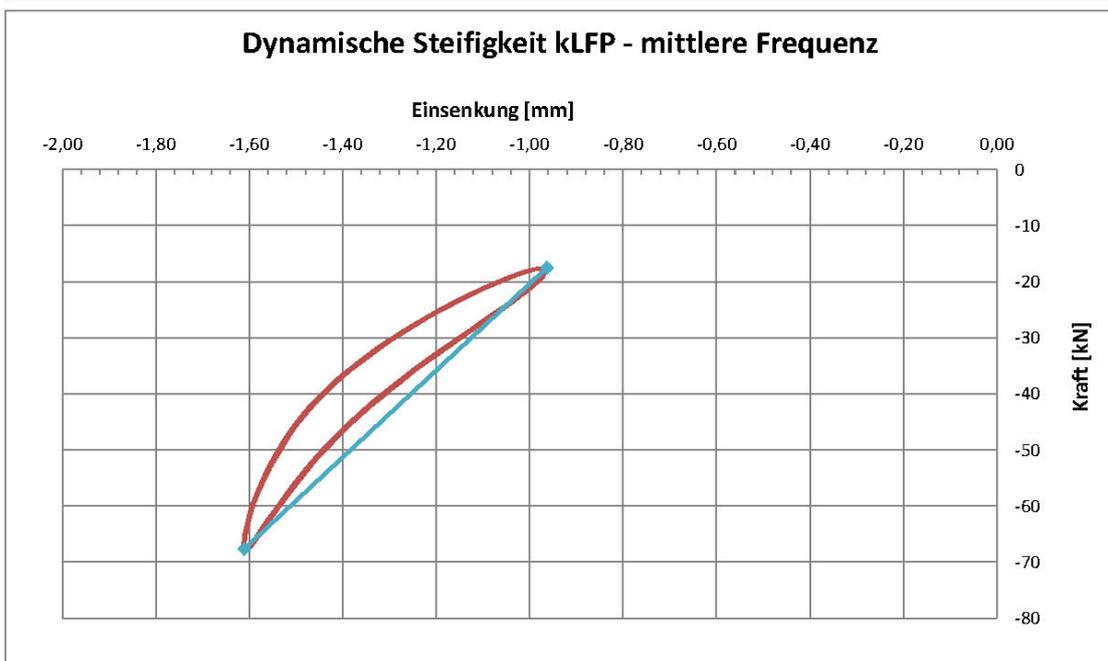
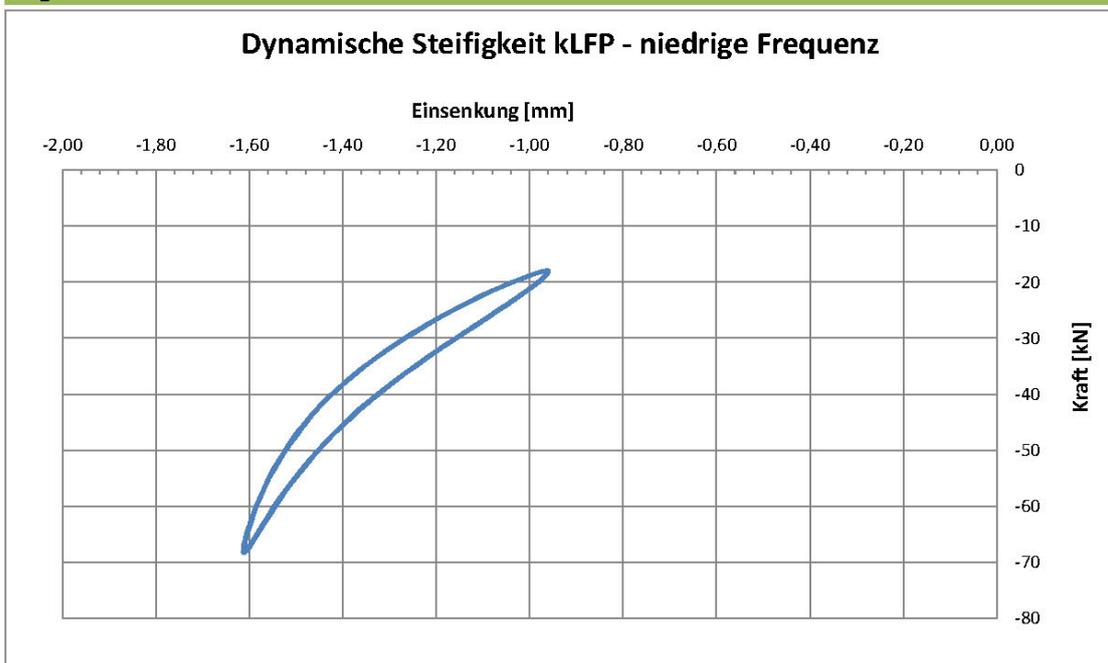
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	74,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	81,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	902
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	50

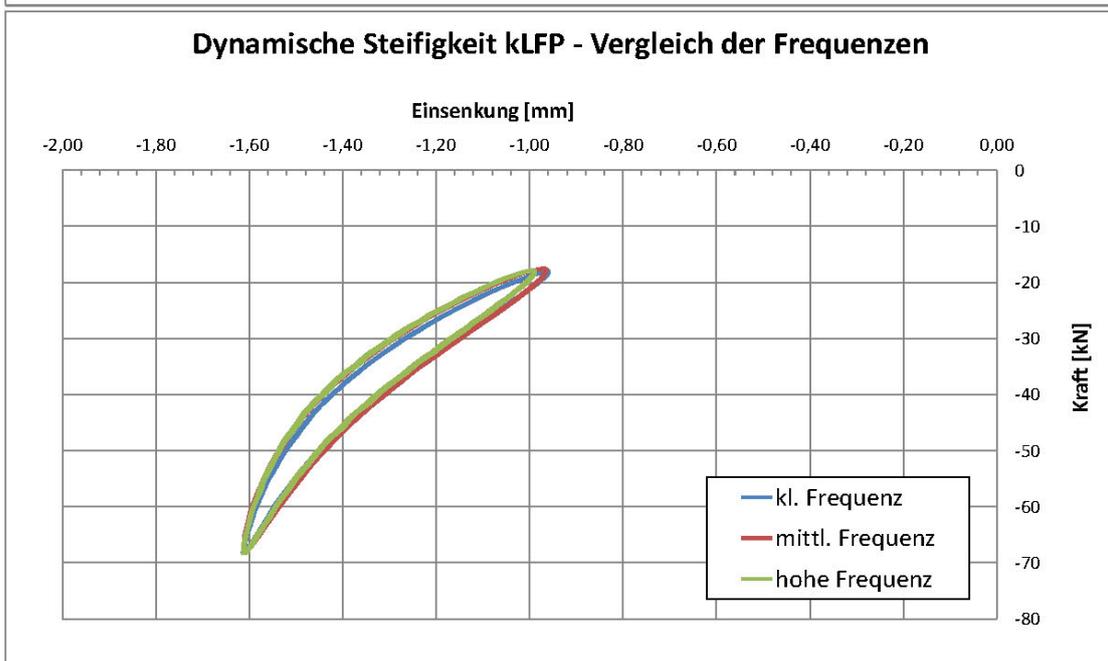
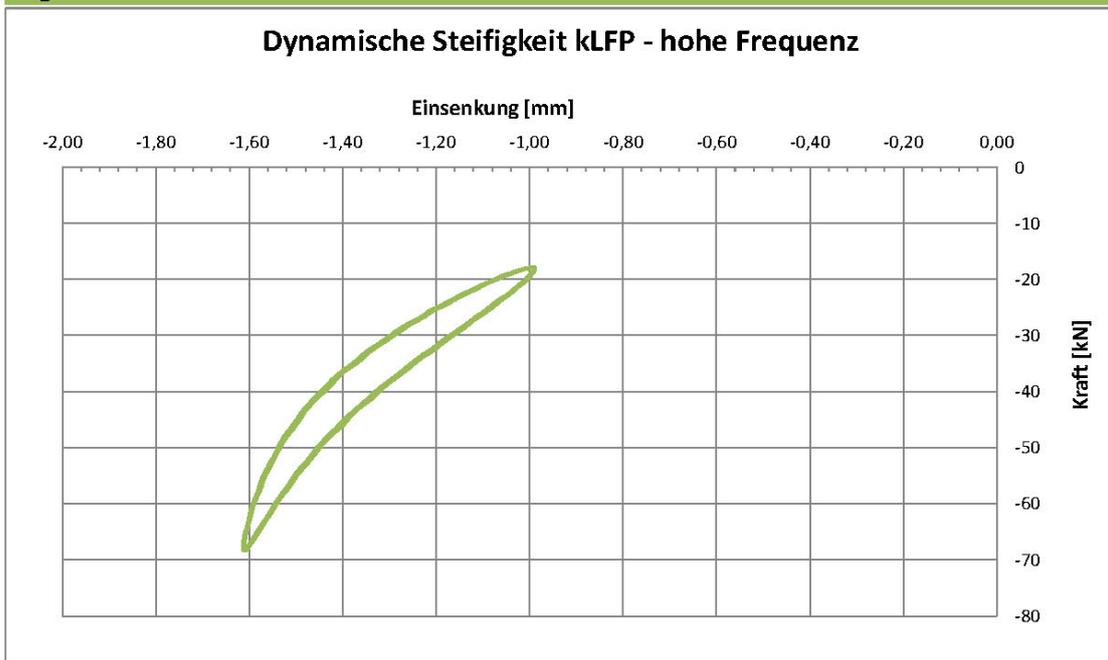
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	74,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	81,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	903
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	3
Messwerte / Zyklus	50

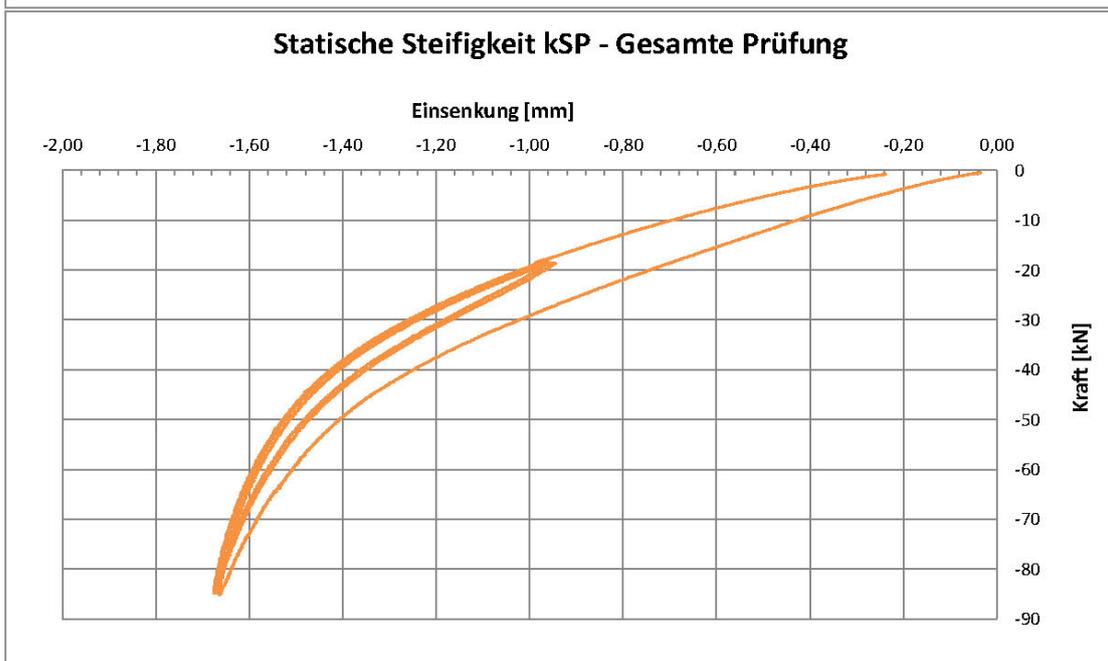
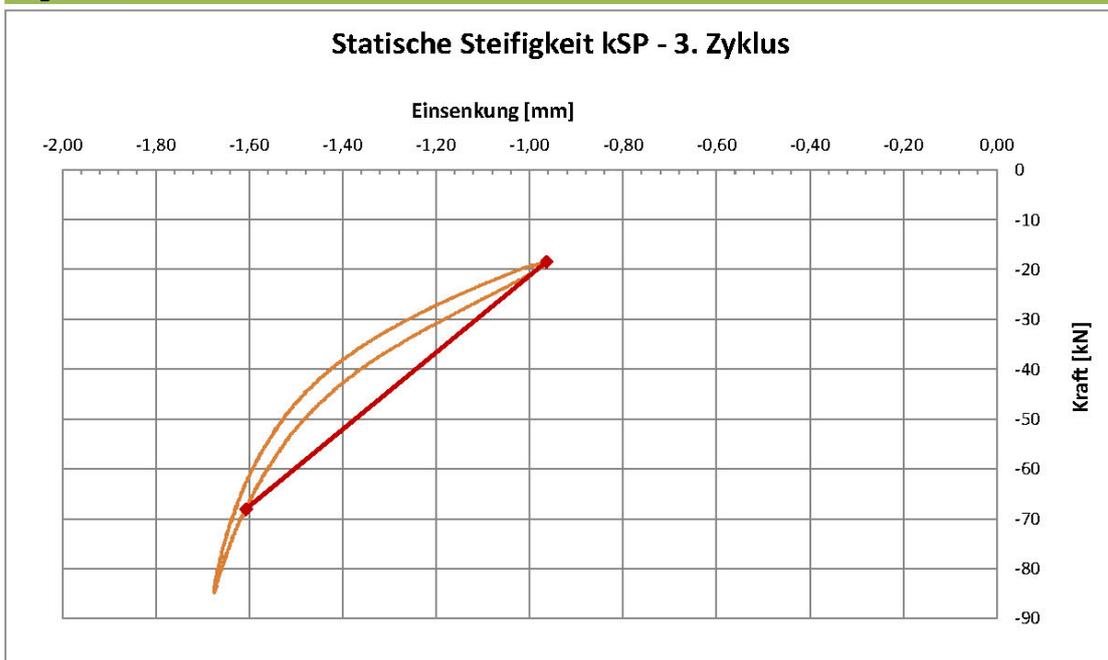
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	77,1	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,6	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	903
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	3
Messwerte / Zyklus	50

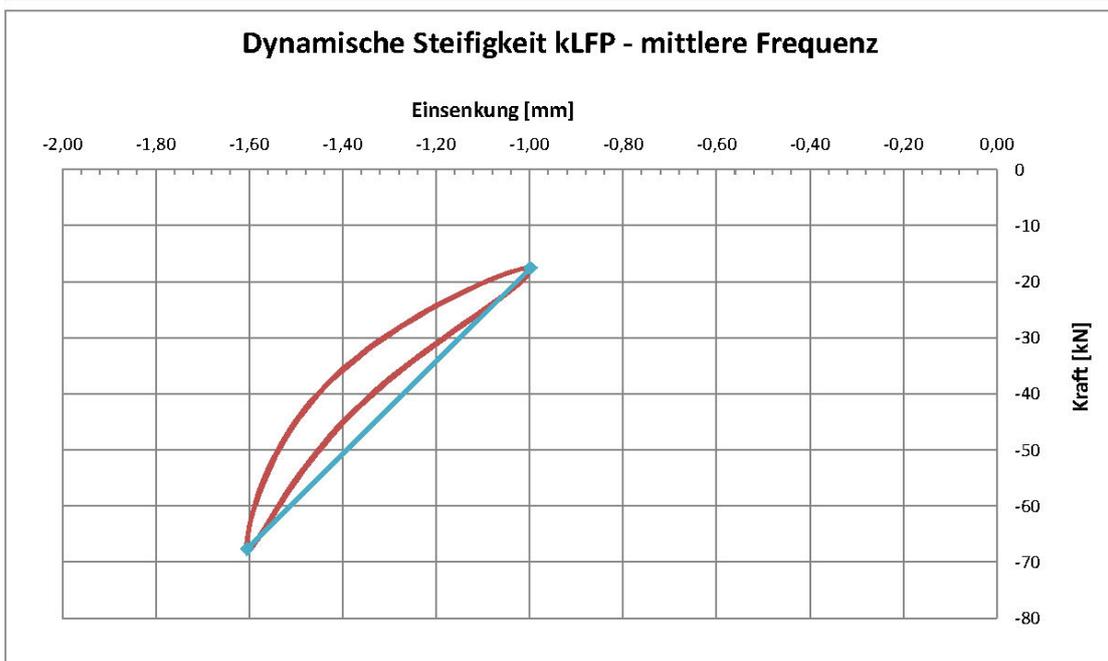
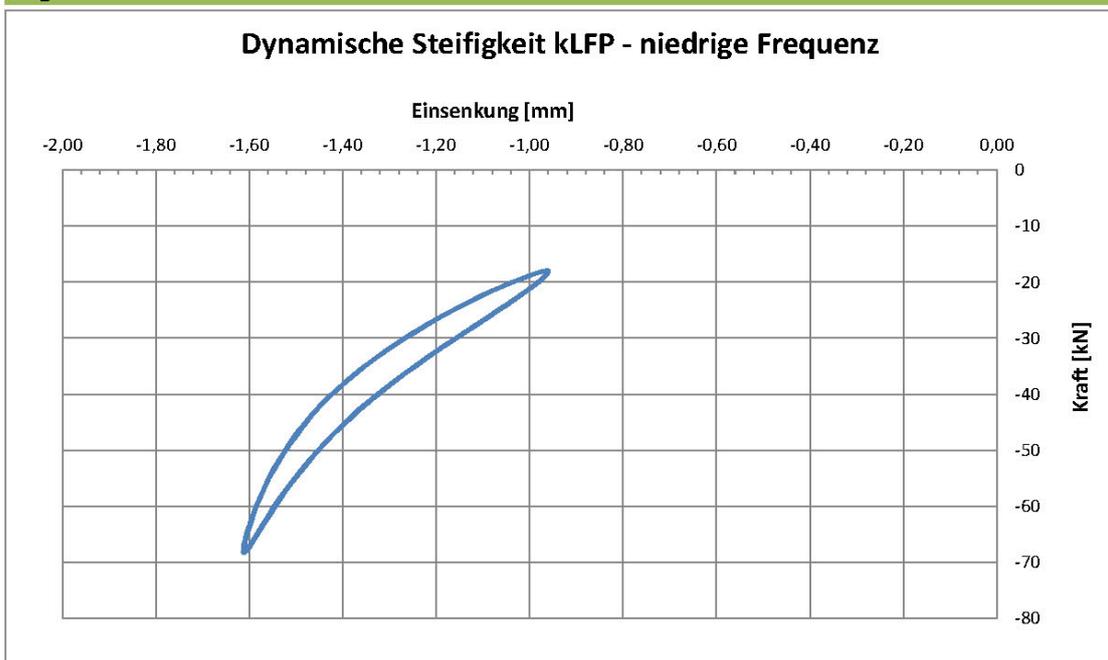
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	77,1	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,6	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	903
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	3
Messwerte / Zyklus	50

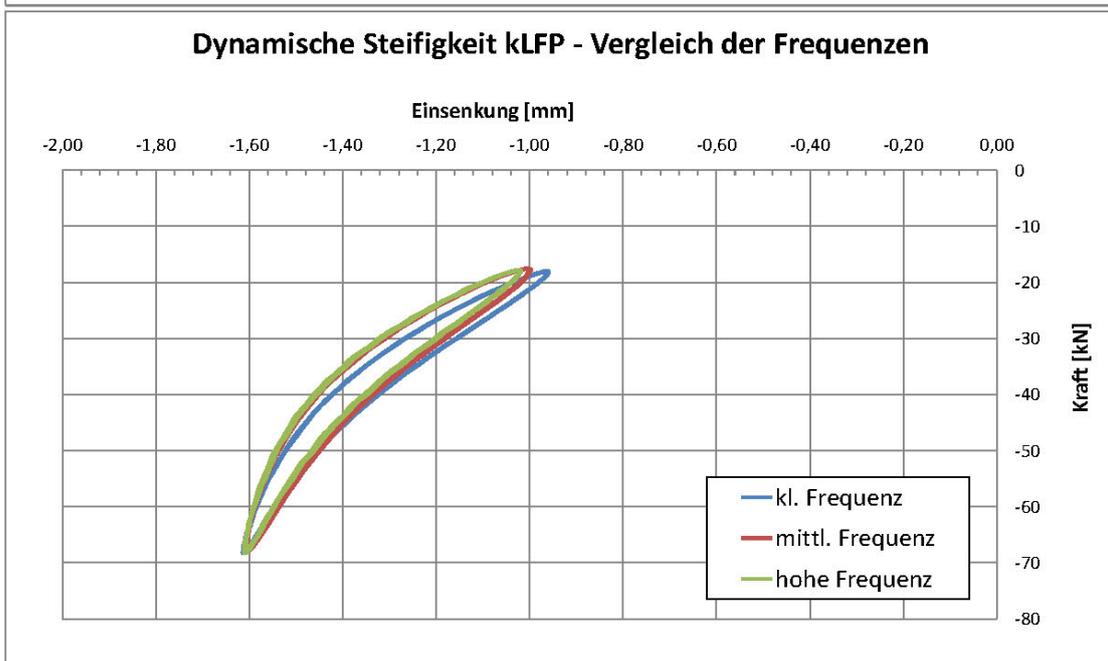
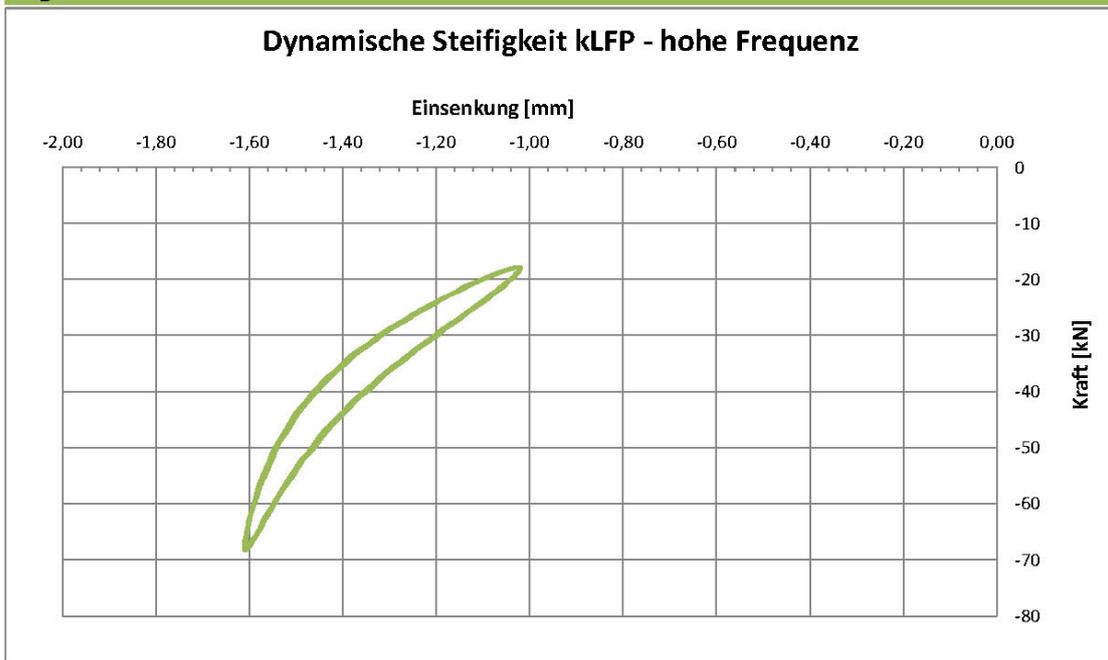
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	77,1	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,6	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	904
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	4
Messwerte / Zyklus	50

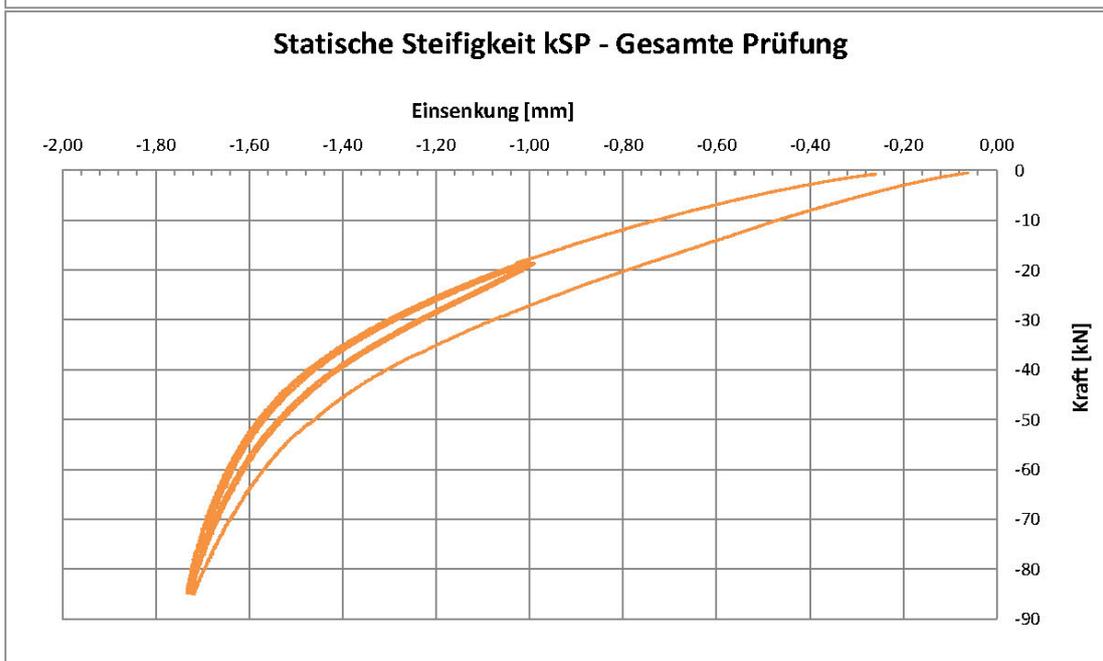
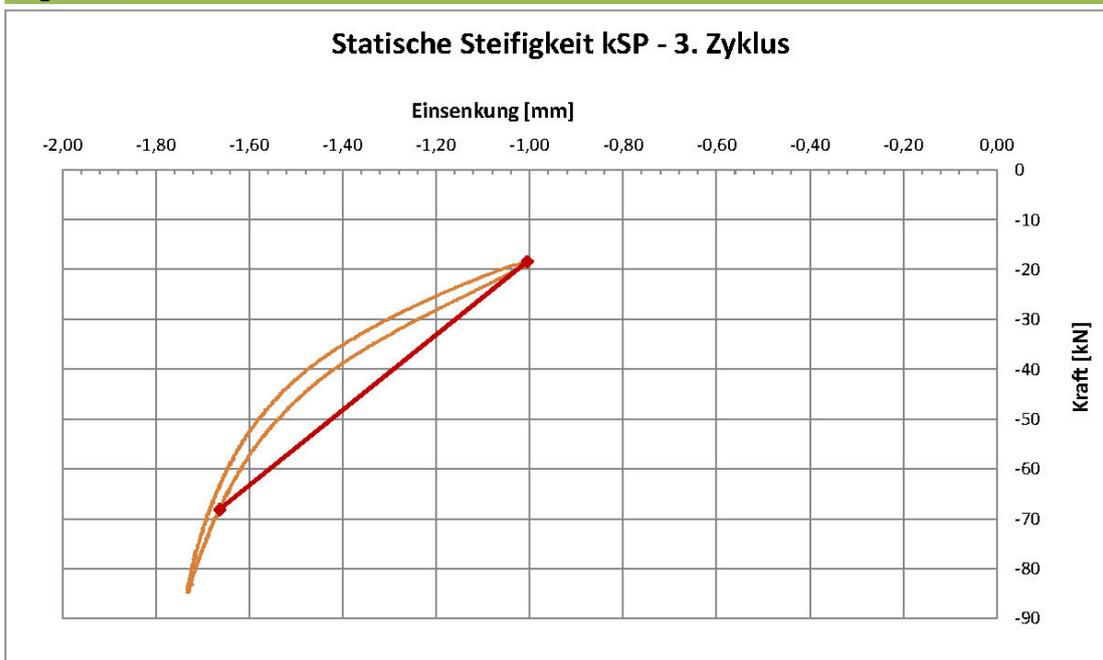
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,2	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	904
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	4
Messwerte / Zyklus	50

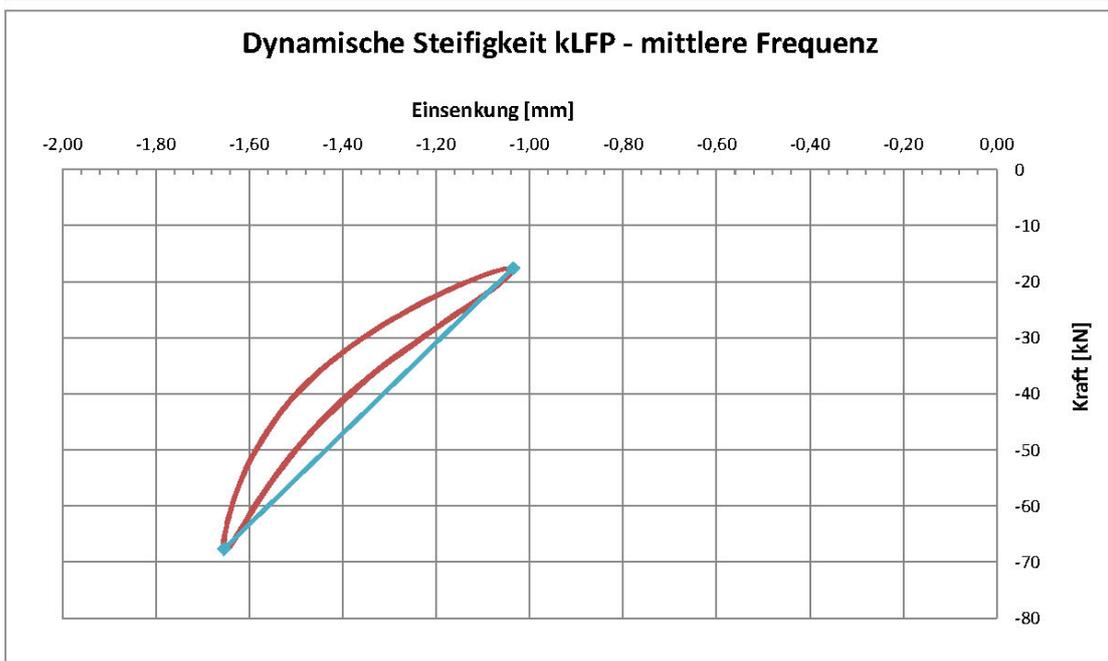
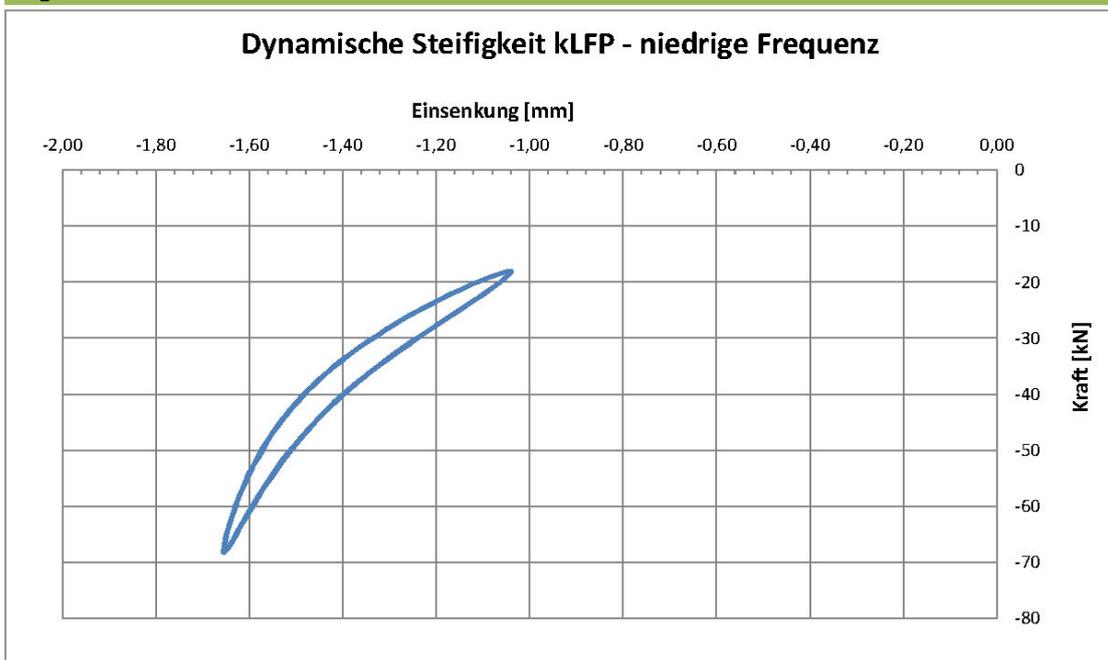
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,2	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	904
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	4
Messwerte / Zyklus	50

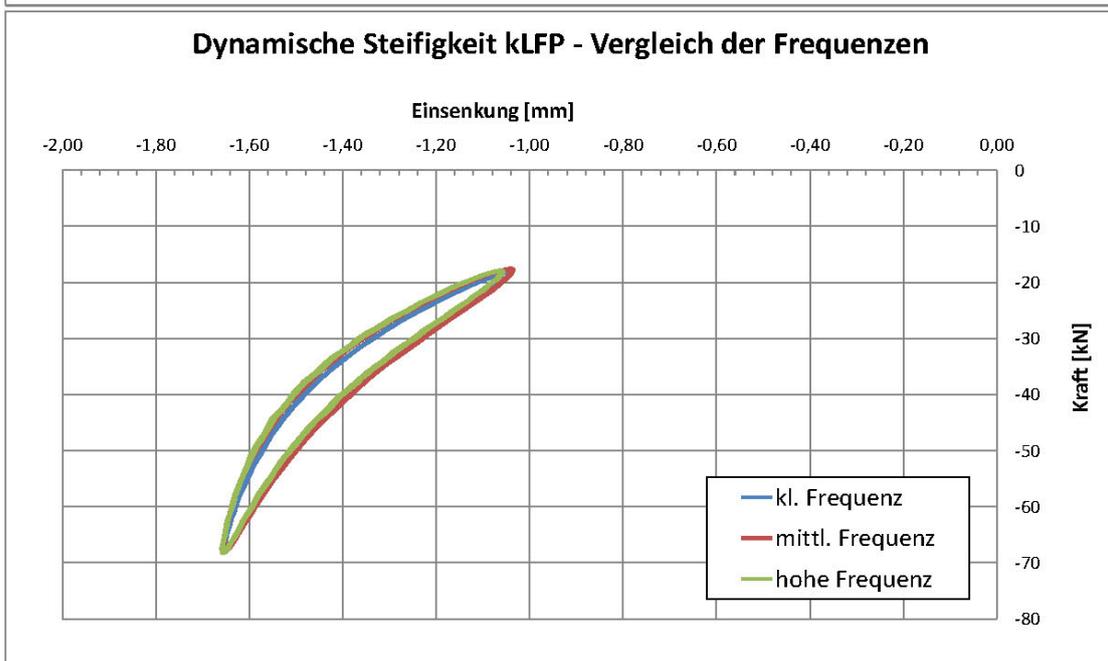
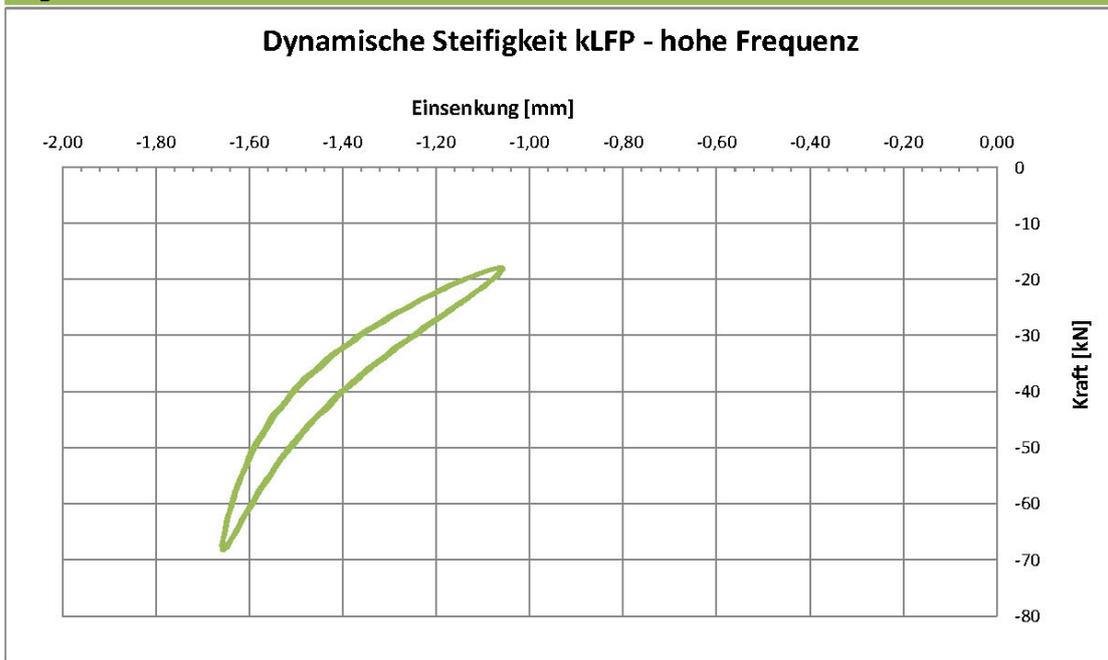
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,7	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,2	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	905
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	5
Messwerte / Zyklus	50

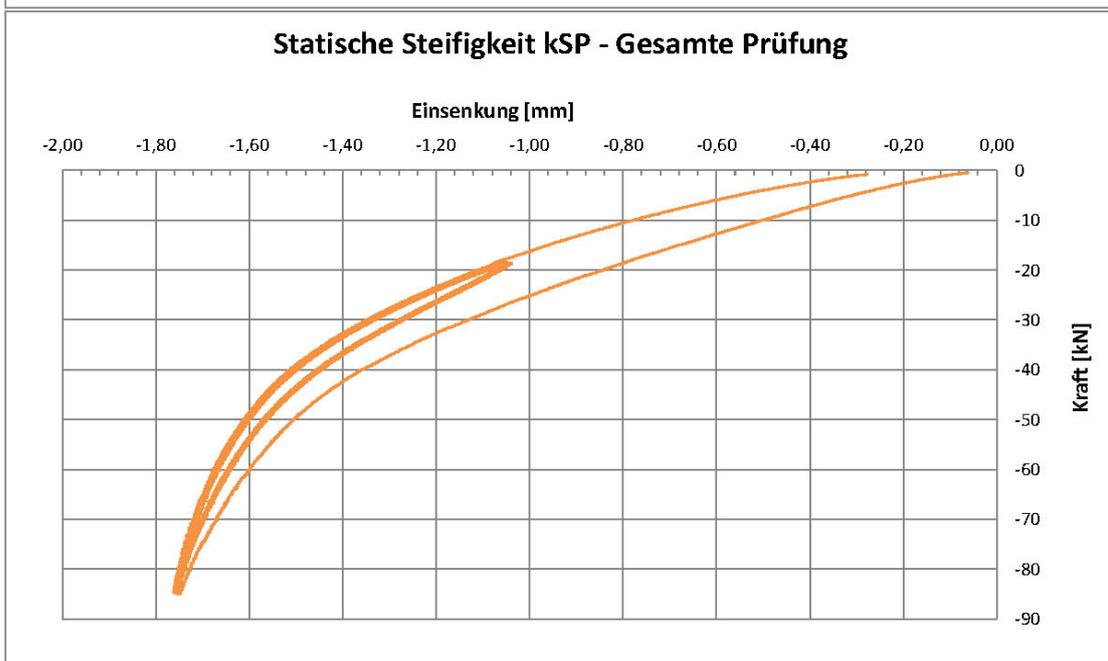
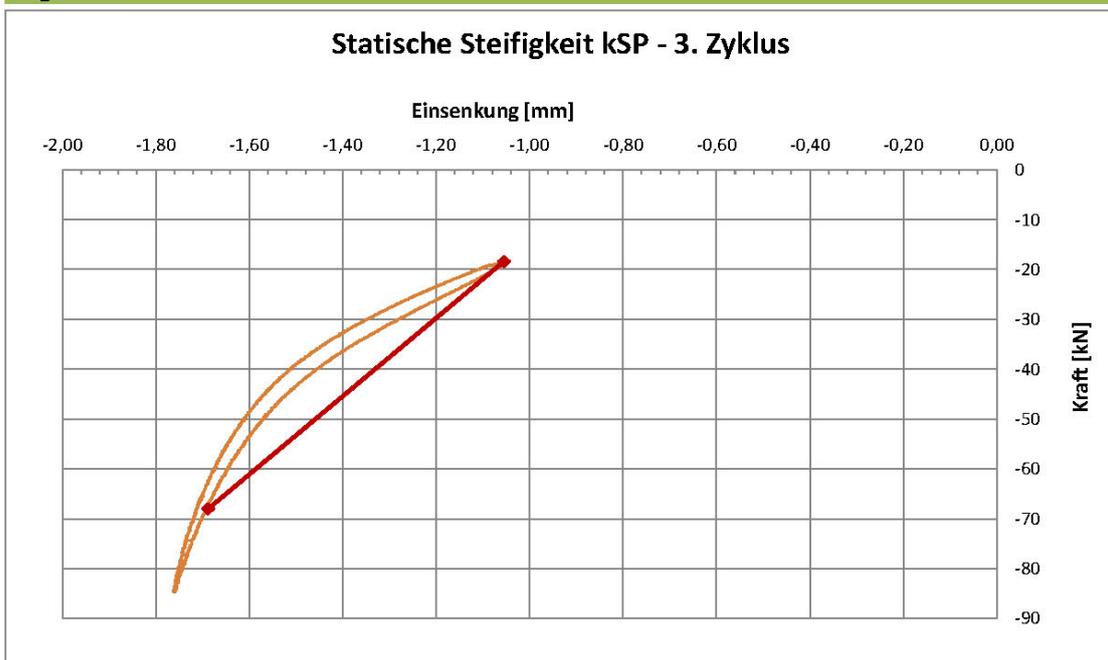
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	78,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	84,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	905
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	5
Messwerte / Zyklus	50

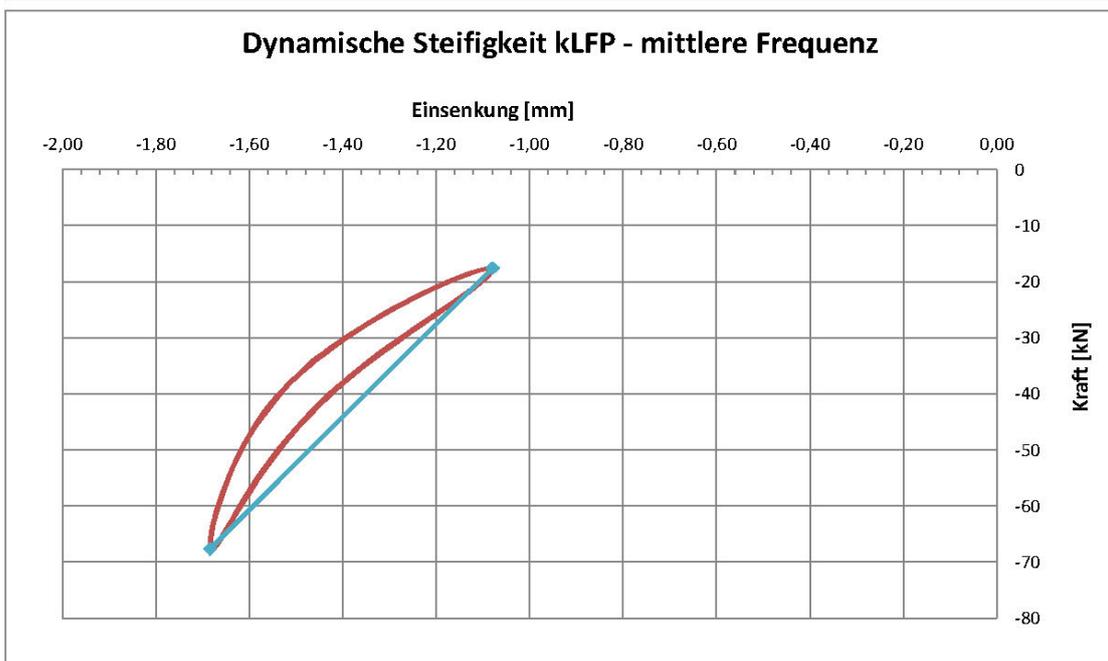
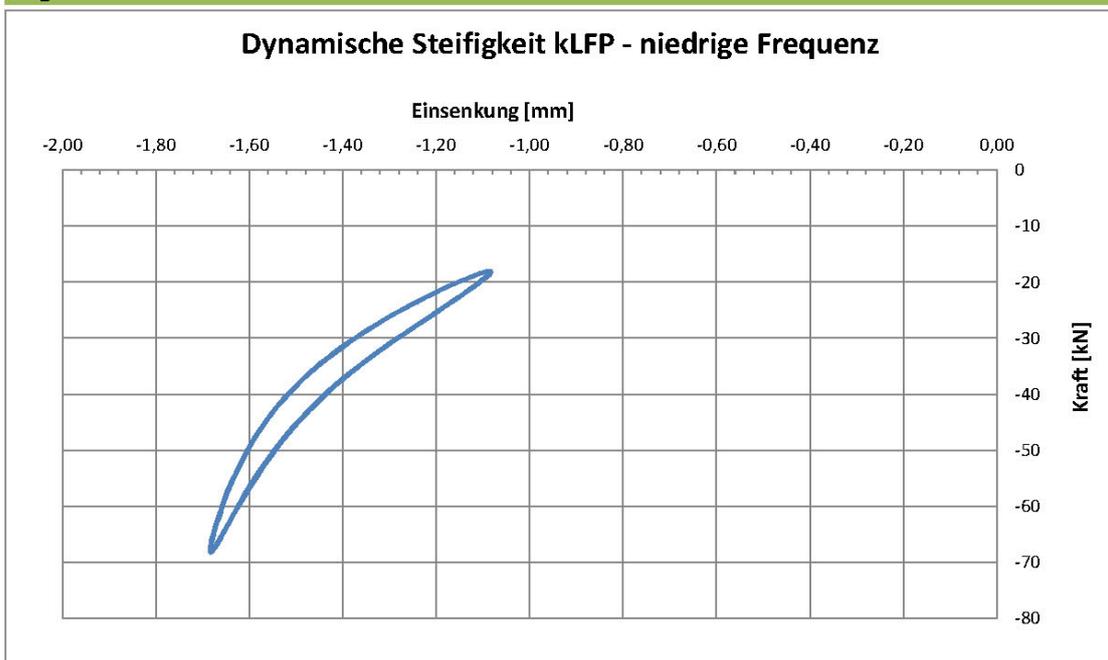
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	78,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	84,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	905
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	5
Messwerte / Zyklus	50

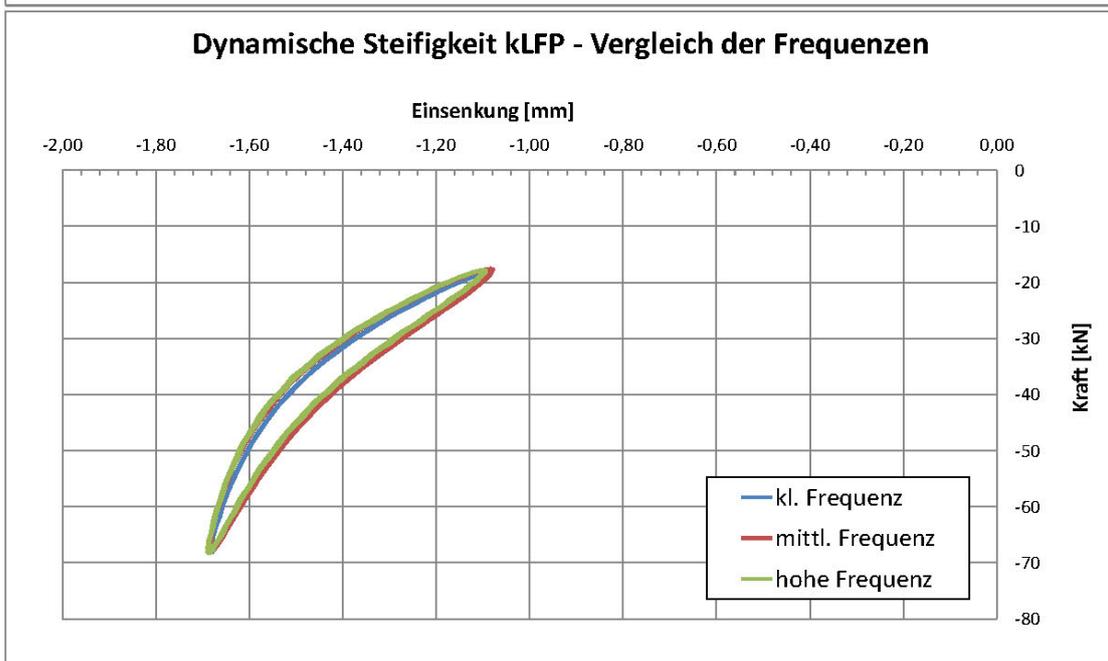
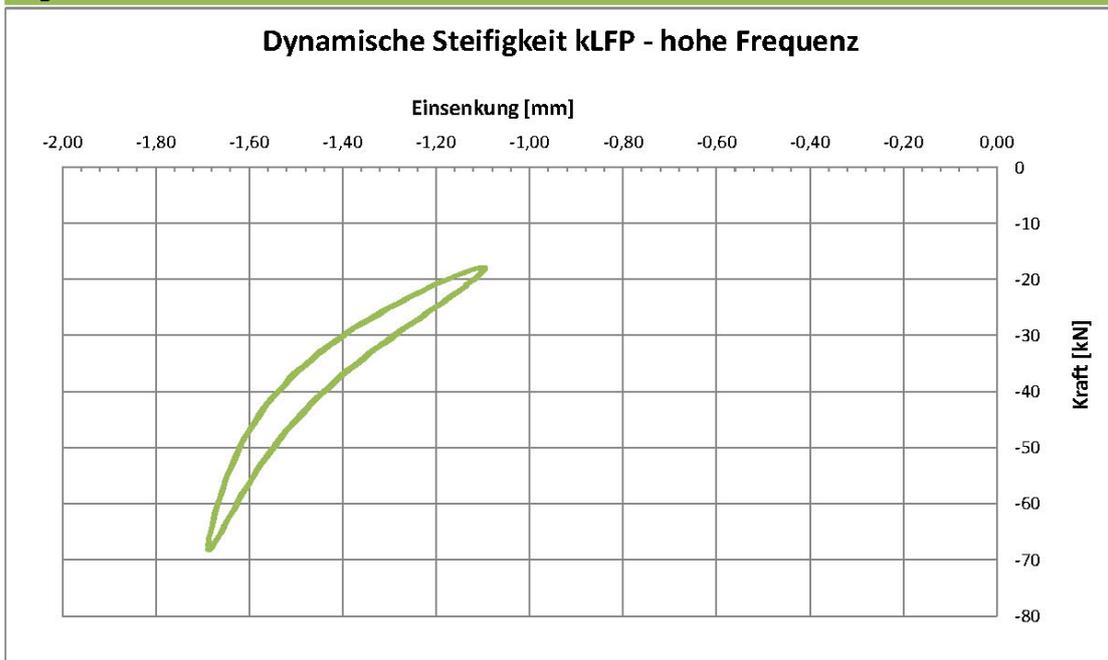
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	78,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	84,2	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	85,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	906
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	6
Messwerte / Zyklus	50

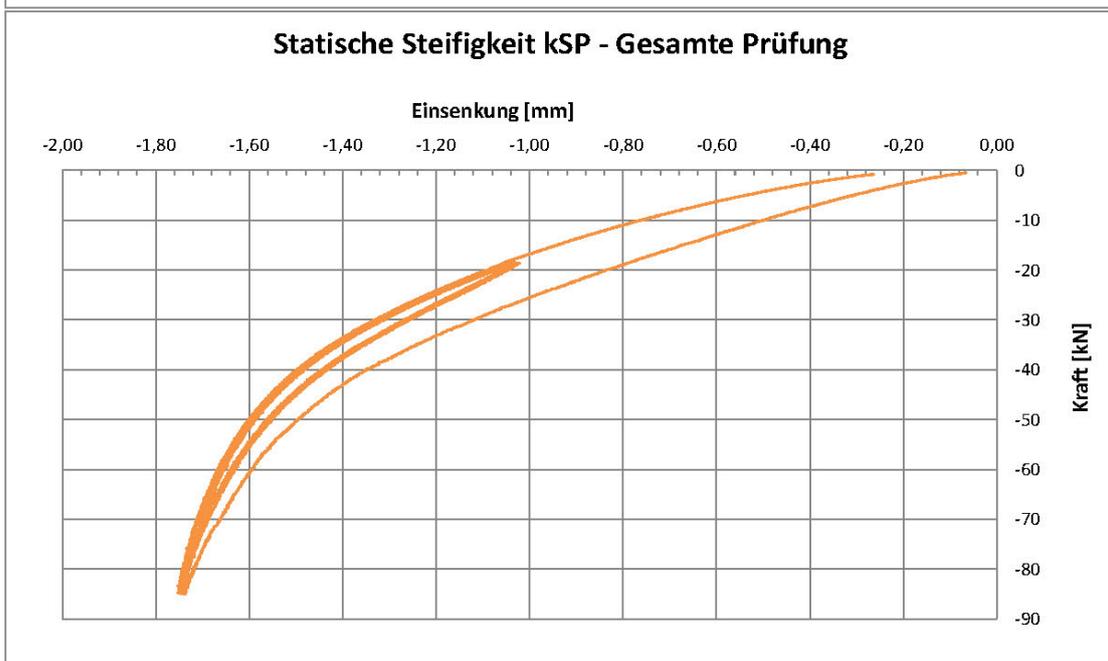
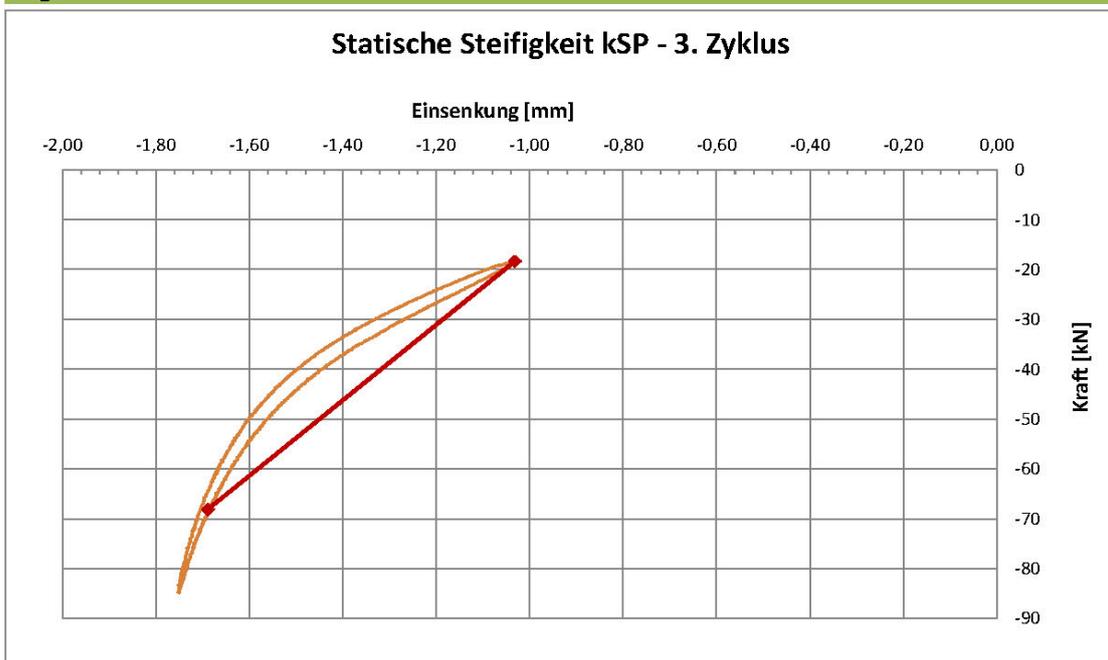
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	906
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	6
Messwerte / Zyklus	50

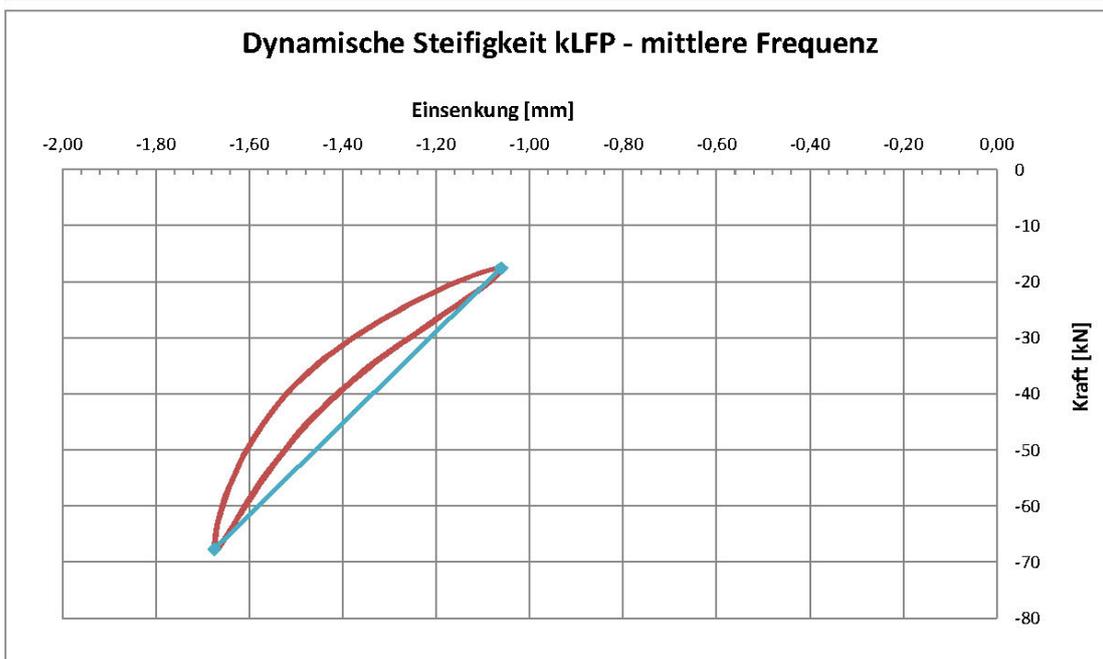
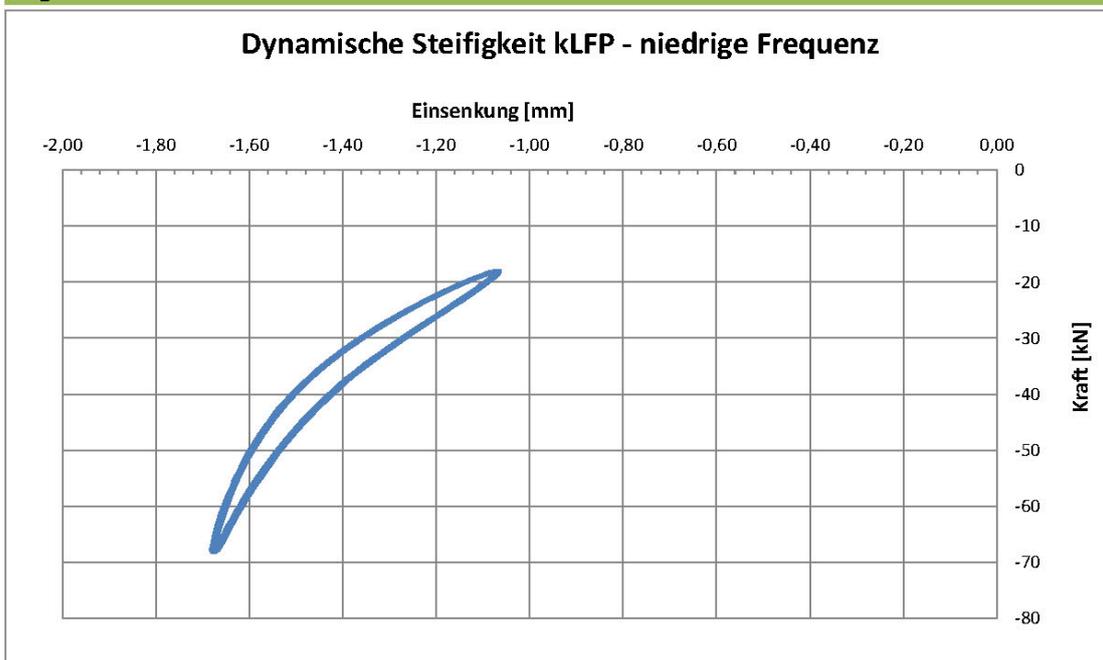
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

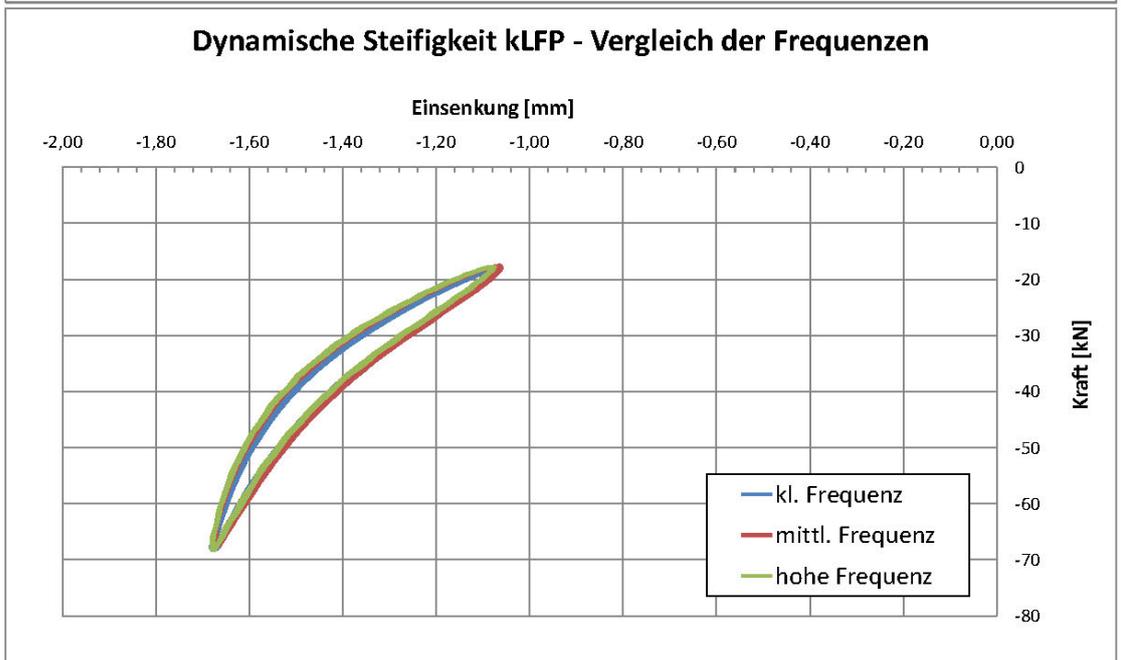
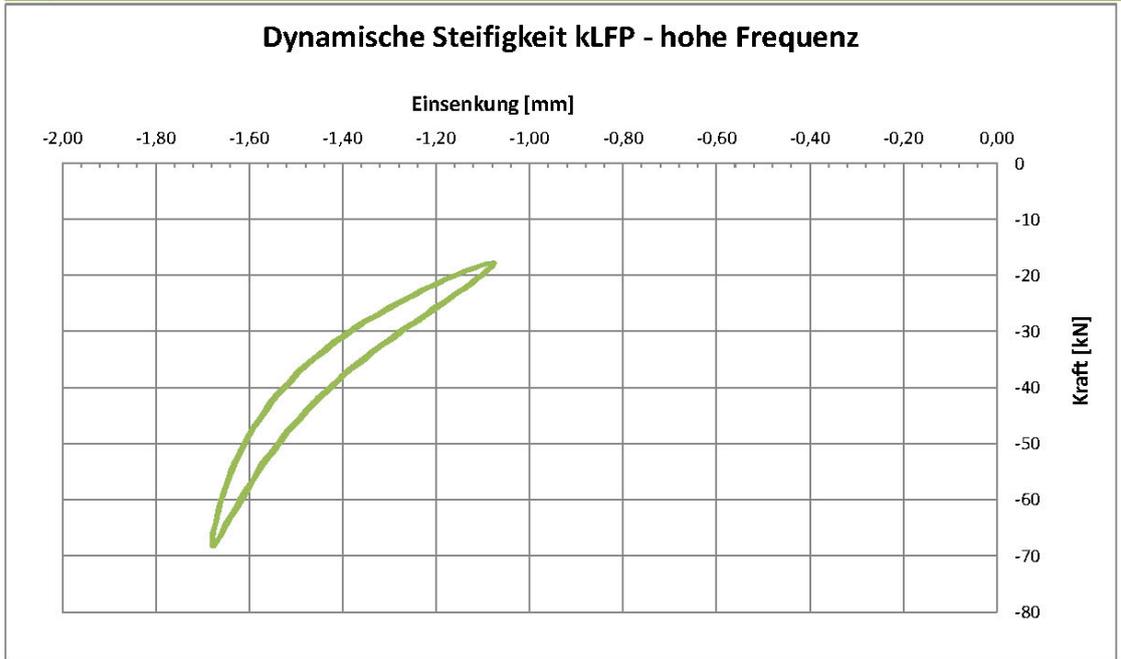
Maschine	Prüffeld
Testlauf	906
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	6
Messwerte / Zyklus	50

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	84,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

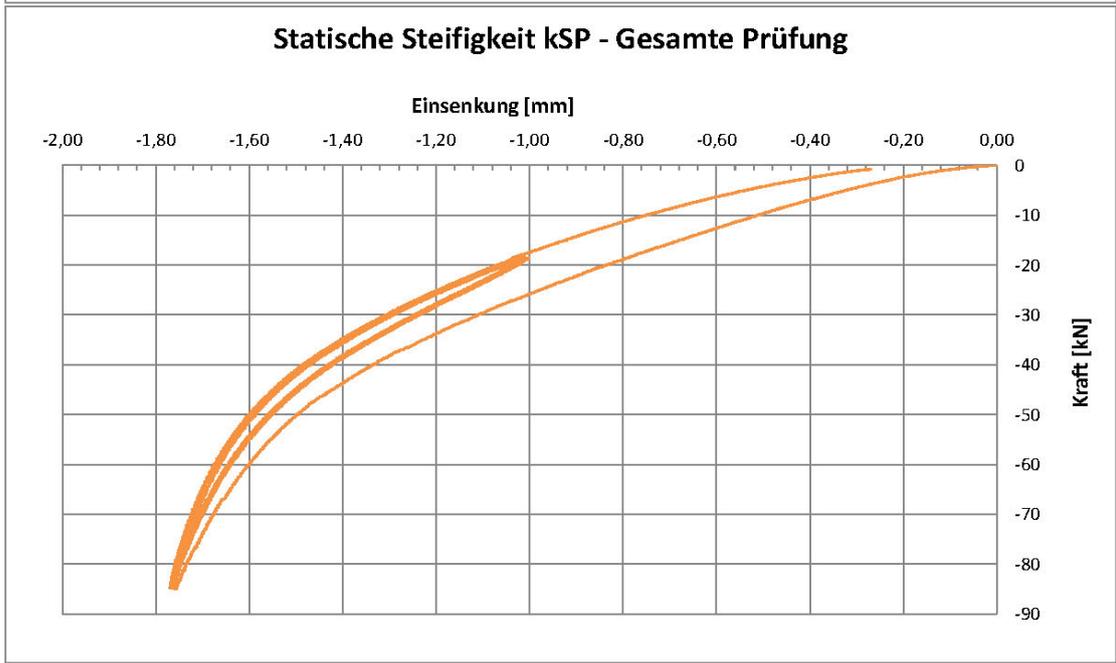
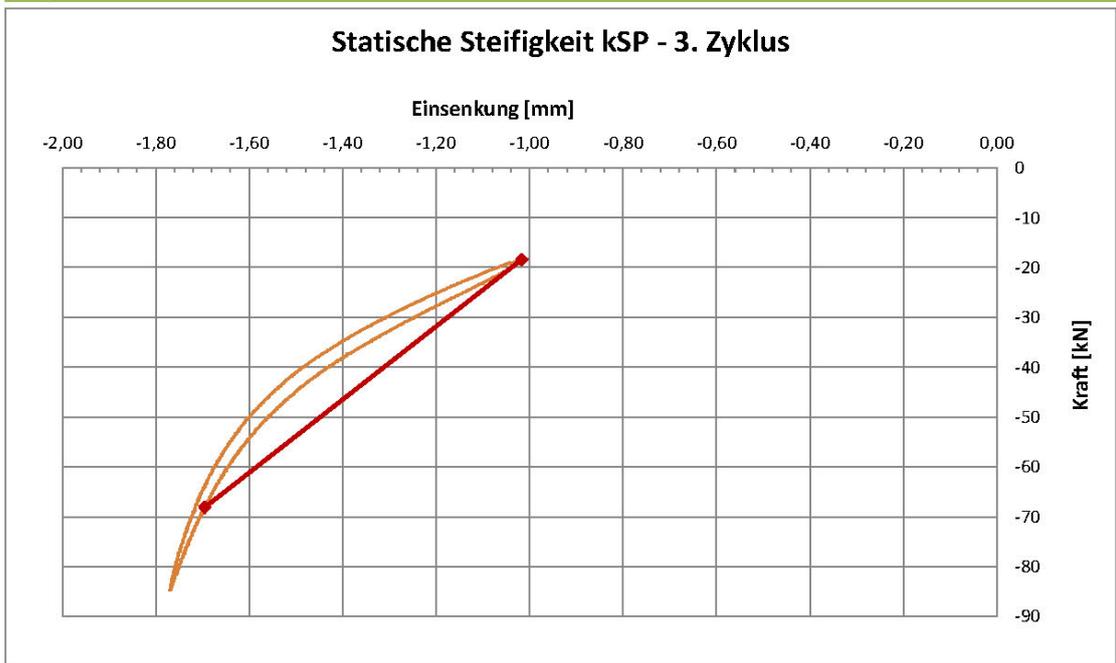
Maschine	Prüffeld
Testlauf	907
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	7
Messwerte / Zyklus	50

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	78,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	907
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	7
Messwerte / Zyklus	50

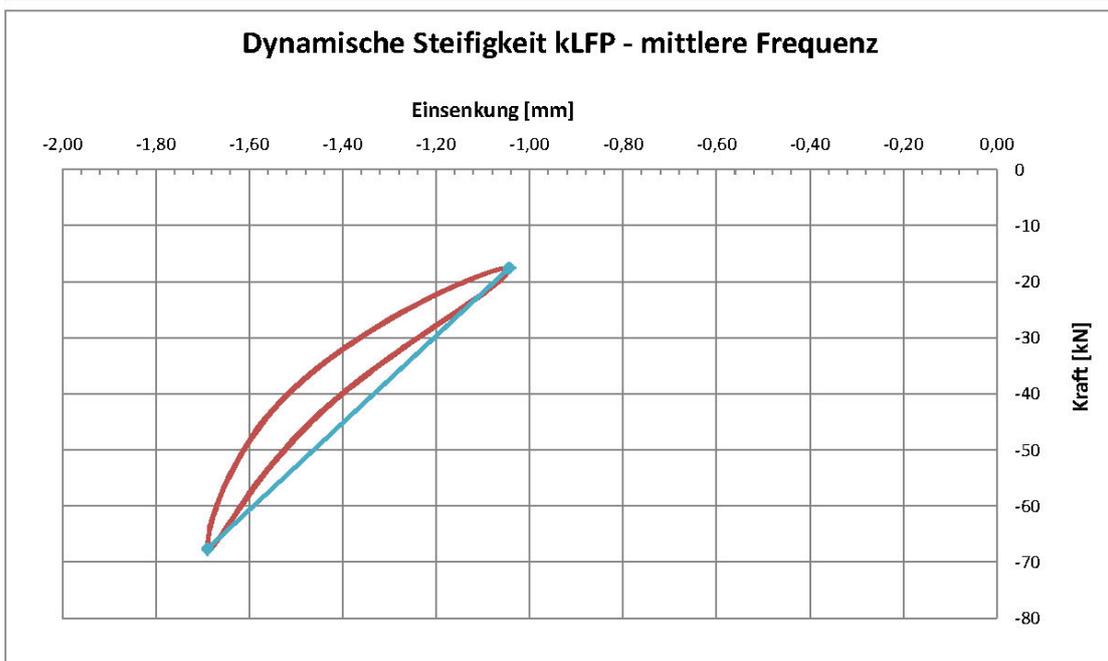
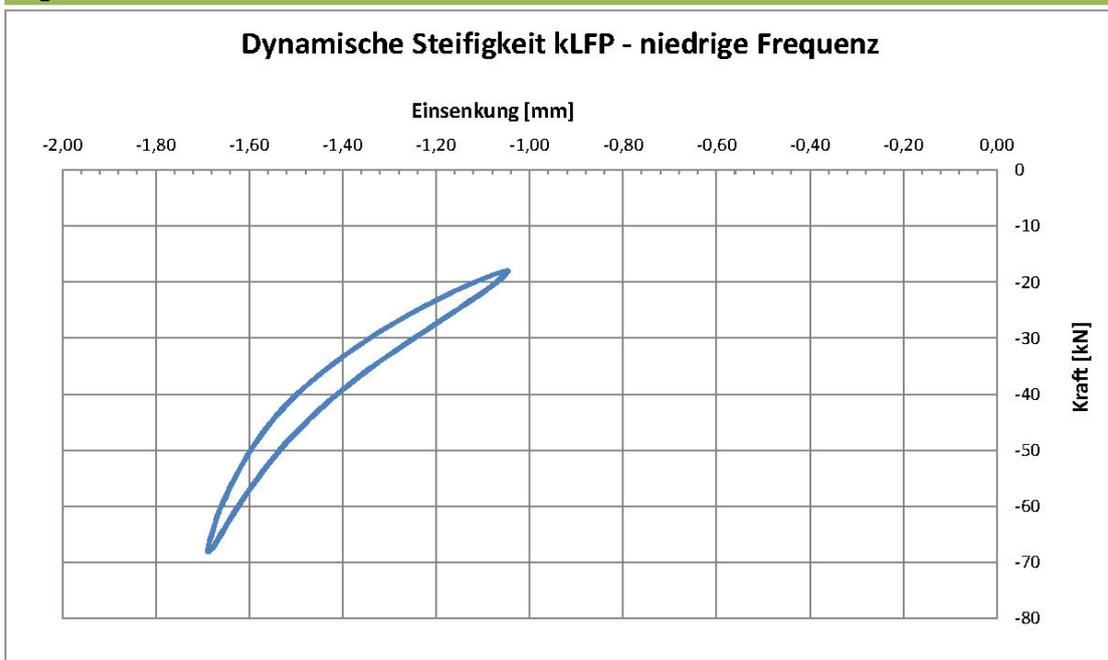
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	78,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	907
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	7
Messwerte / Zyklus	50

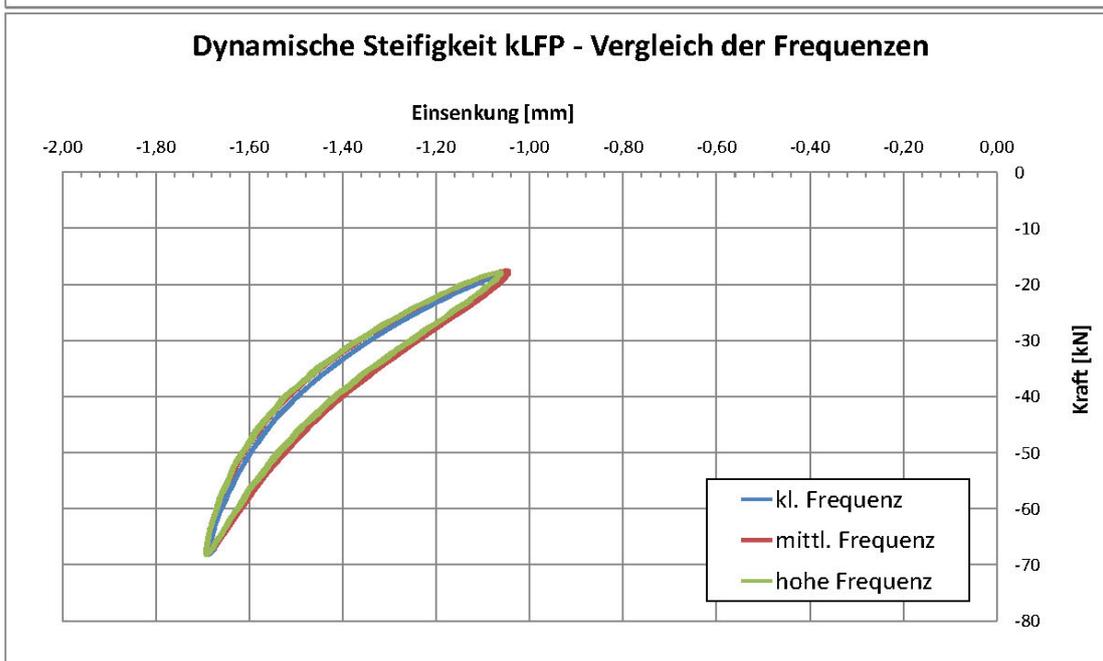
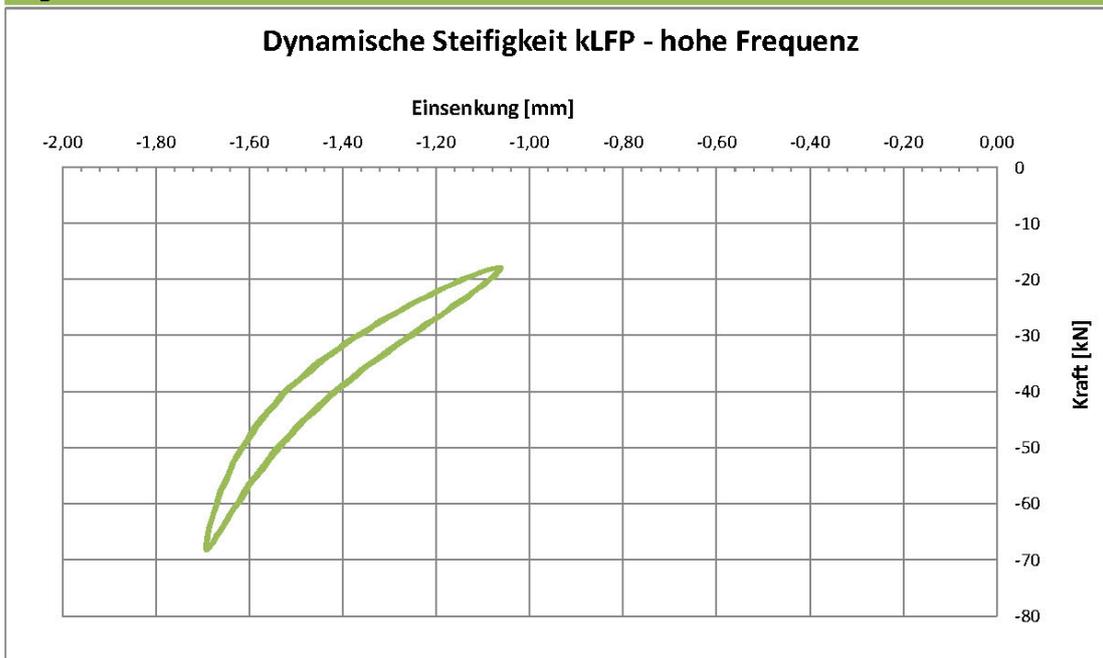
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,3	kN/mm
kLFP - 5 Hz	78,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	908
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	8
Messwerte / Zyklus	50

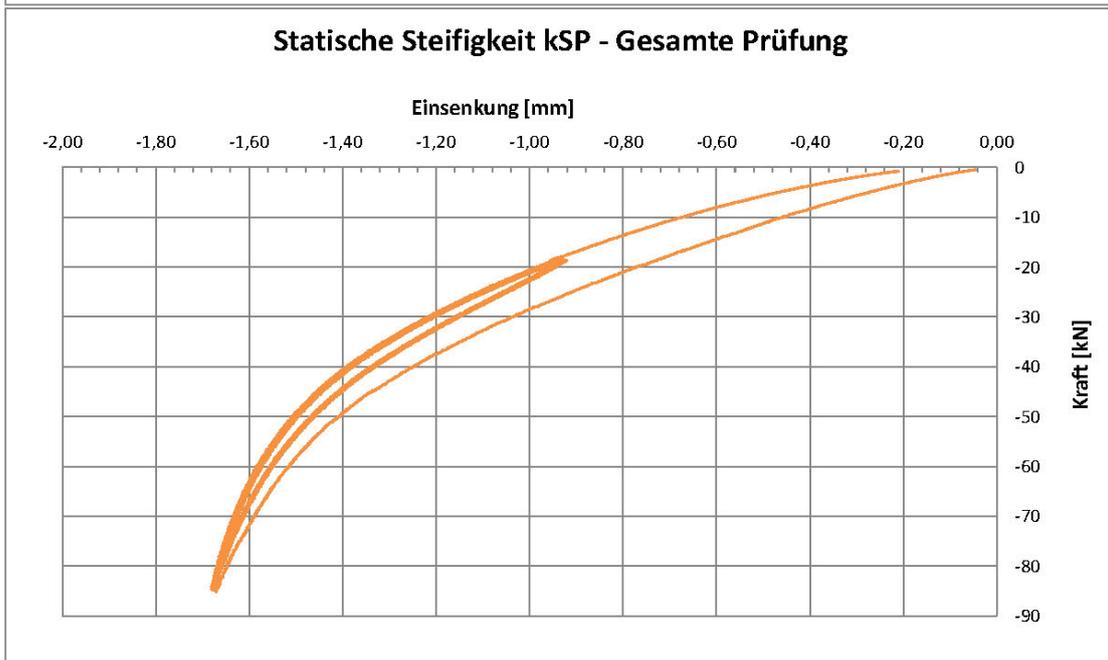
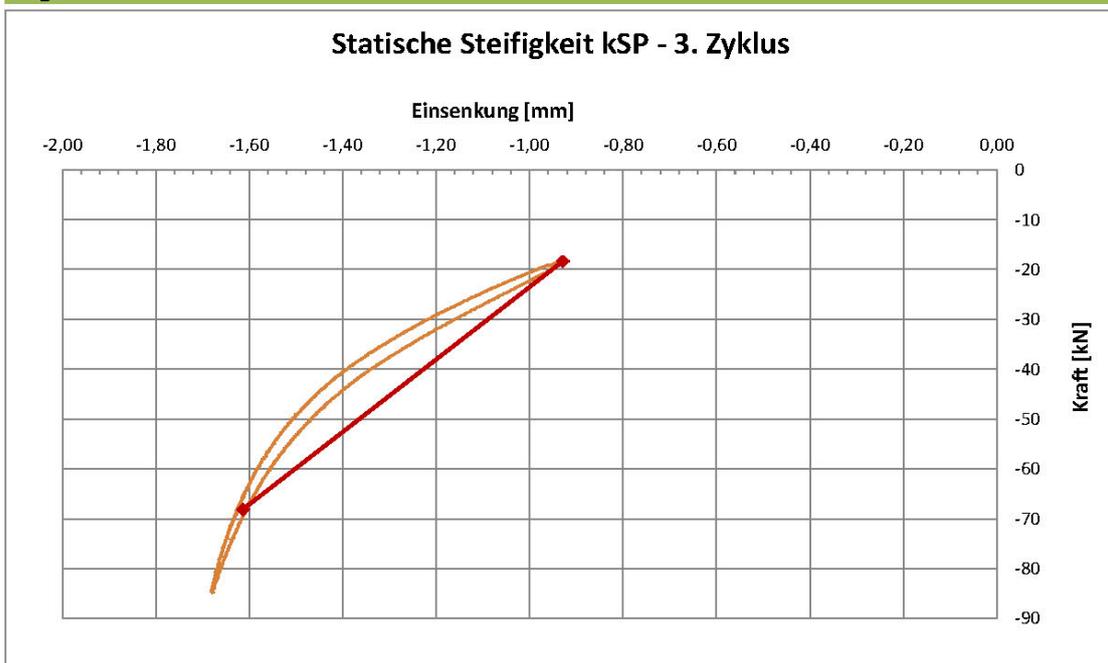
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	72,7	kN/mm
kLFP - 5 Hz	78,9	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

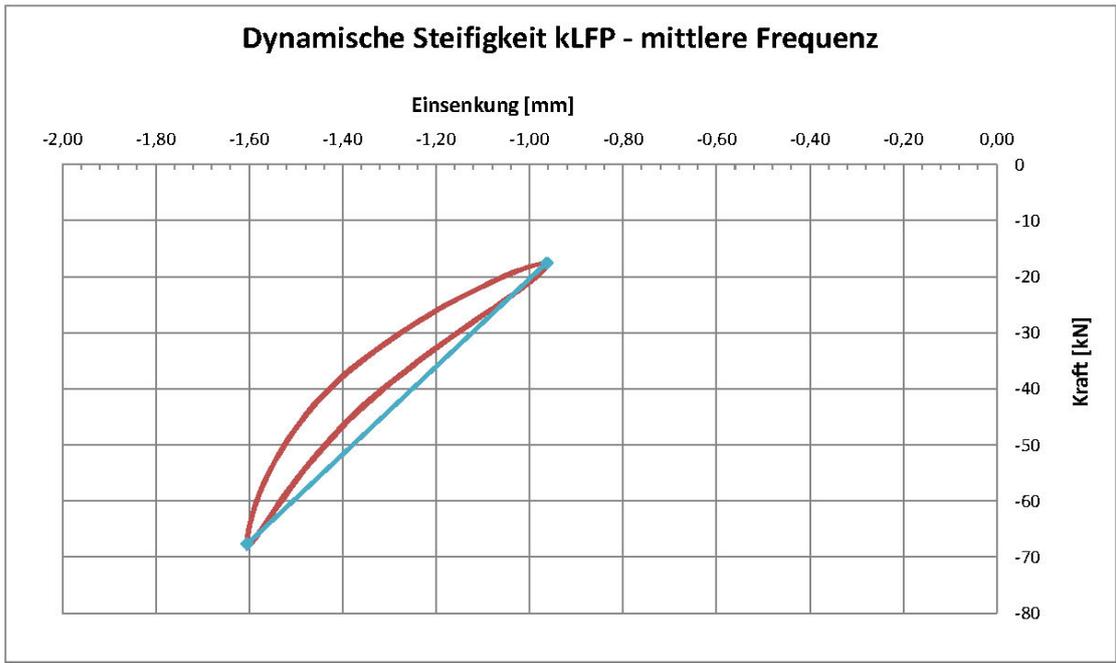
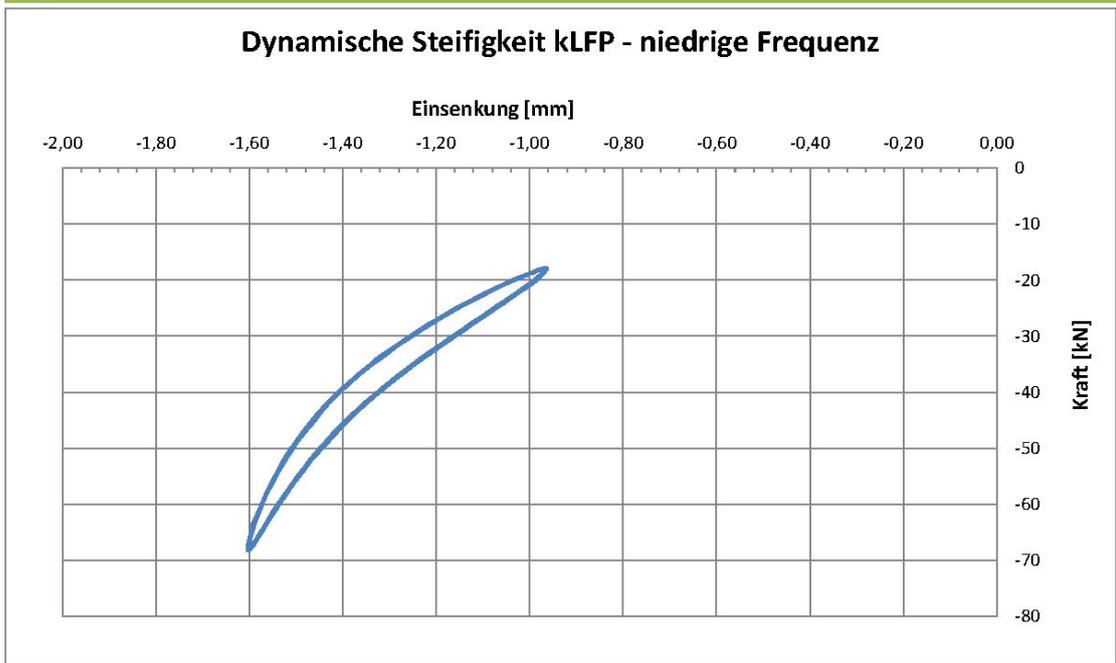
Maschine	Prüffeld
Testlauf	908
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	8
Messwerte / Zyklus	50

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	72,7	kN/mm
kLFP - 5 Hz	78,9	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	Prüffeld
Testlauf	908
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	8
Messwerte / Zyklus	50

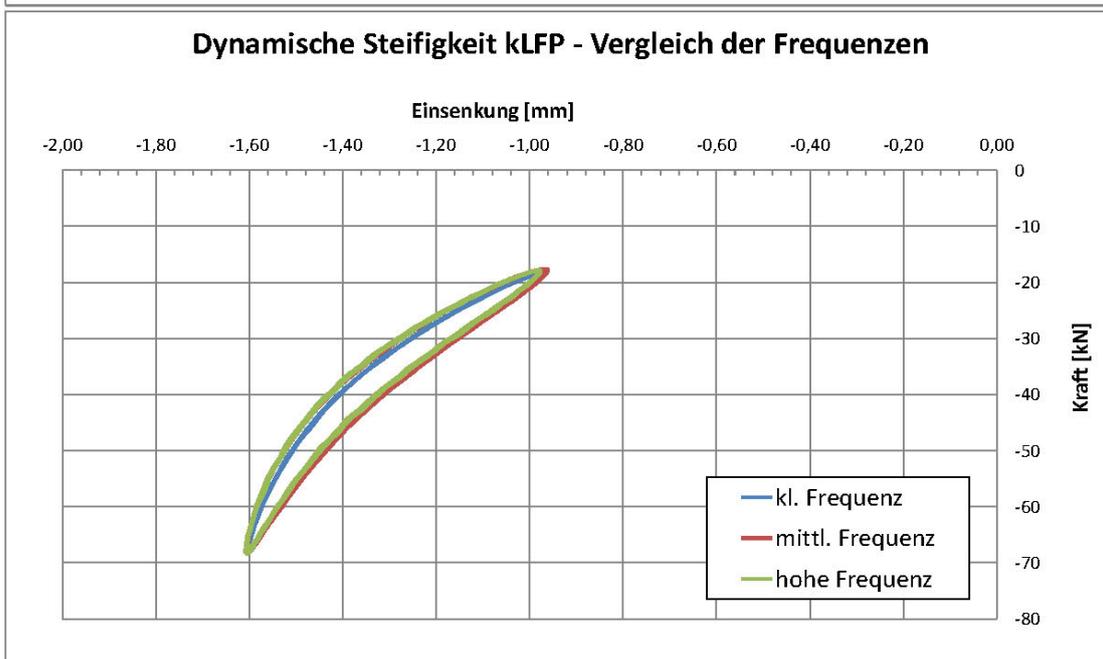
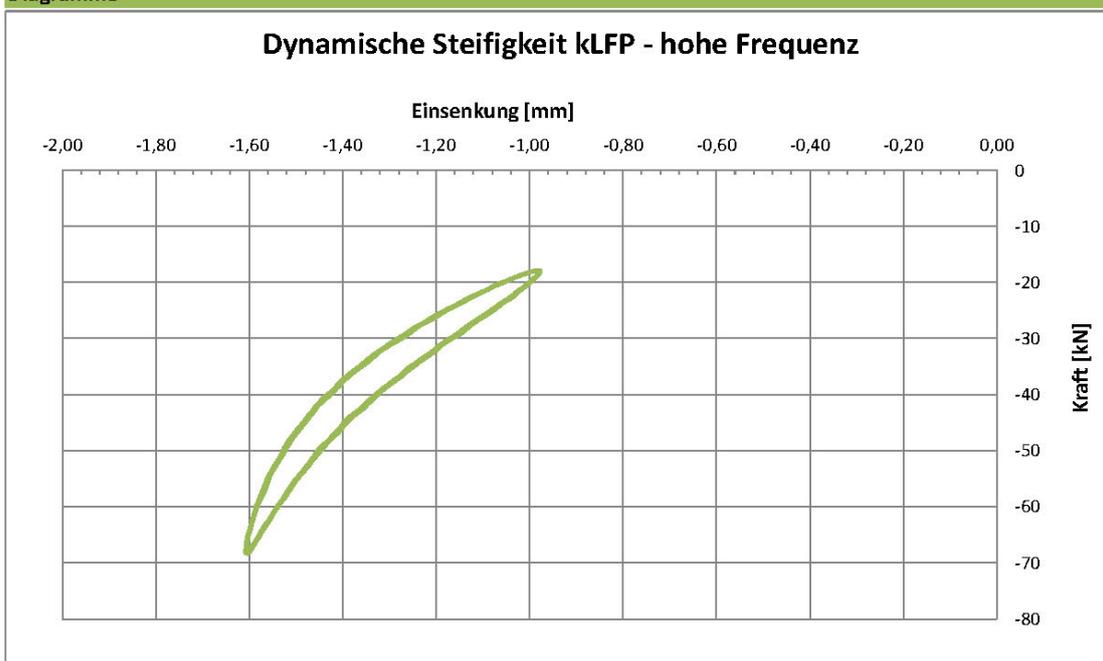
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	72,7	kN/mm
kLFP - 5 Hz	78,9	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,5	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,4	kN/mm

Diagramme



ANHANG C4 – MESSDATENBLÄTTER PRÜFFELD - VERGLEICH

Messdatenblätter

aus den Vergleichsmessungen der statischen
und dynamischen, niederfrequenten Steifigkeiten
an Schienenzwischenlagen
ermittelt an der MTS 322

Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

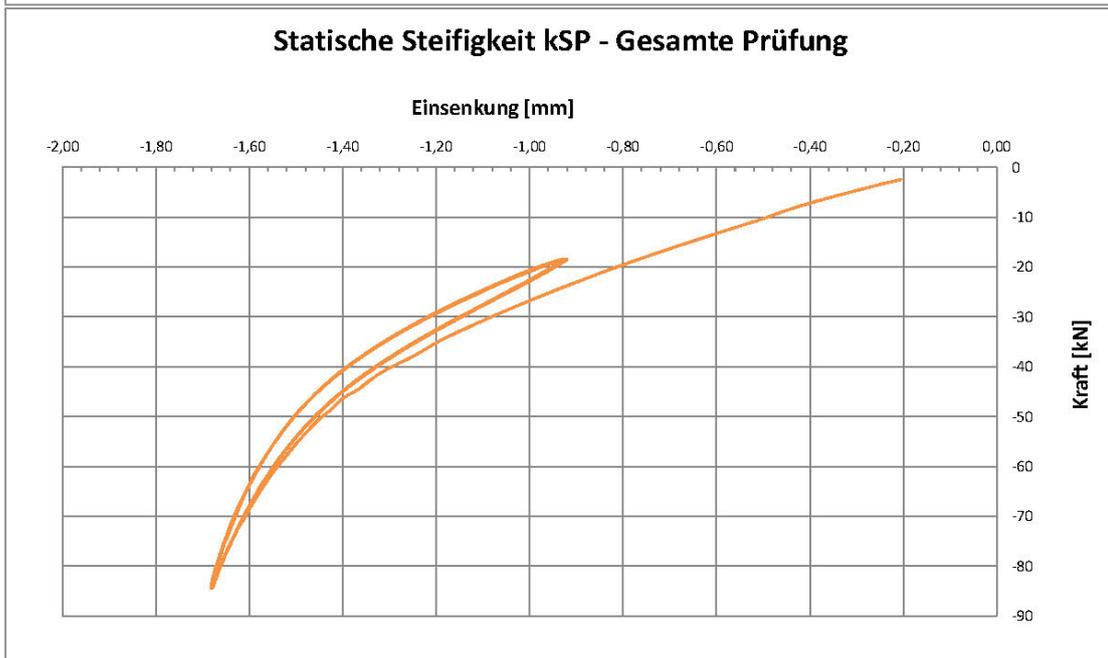
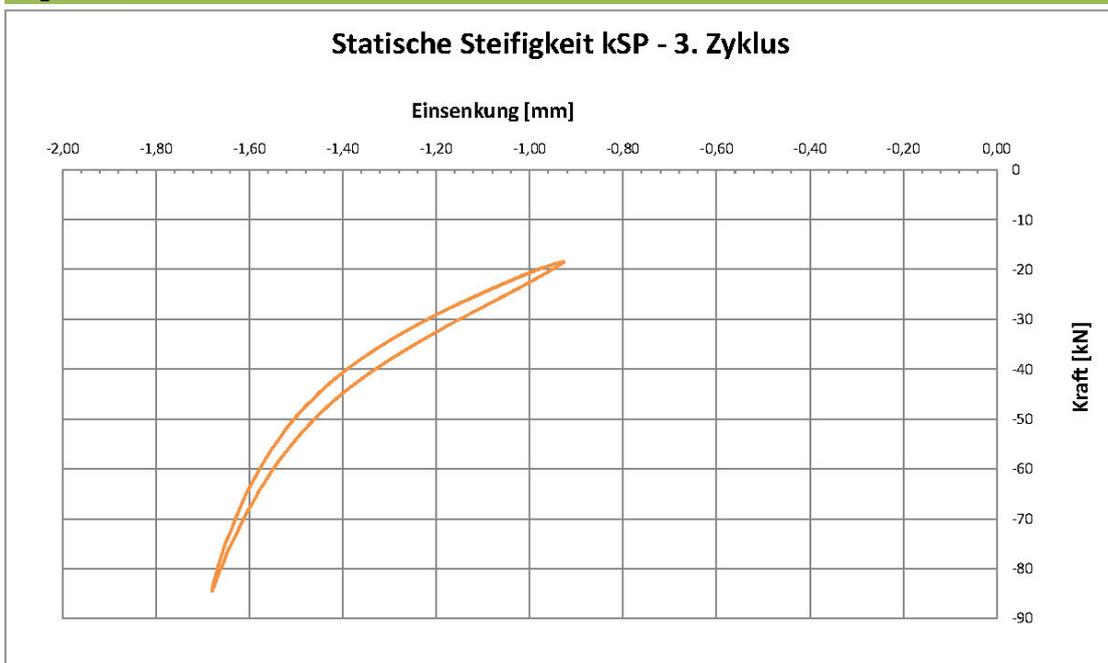
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,9	kN/mm
kLFP - 5 Hz	80,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,8	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

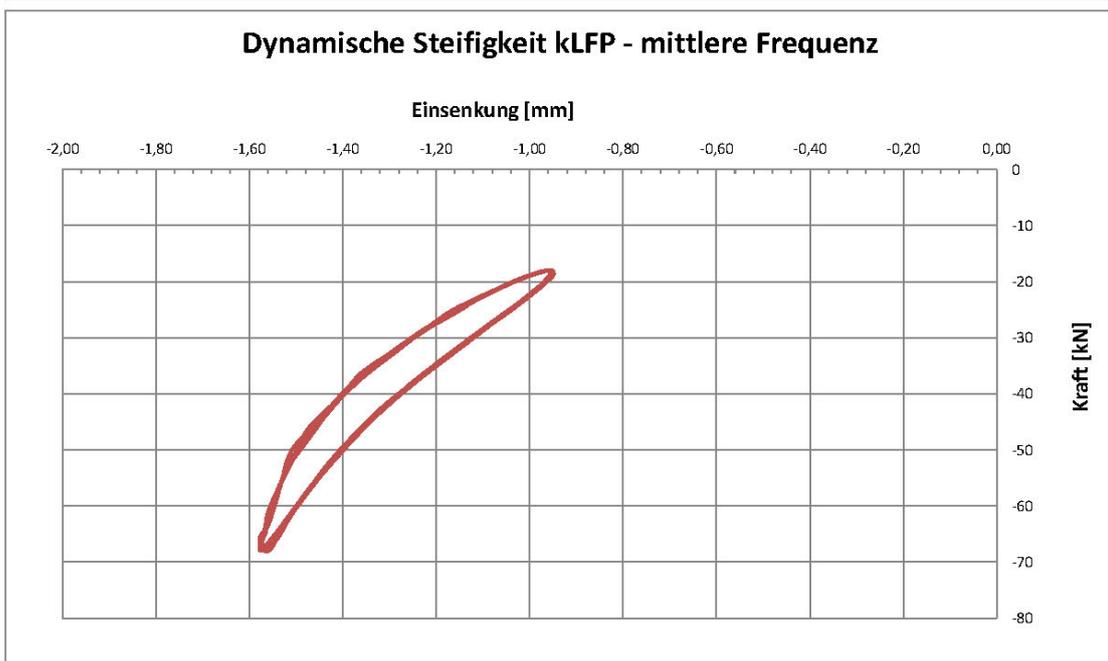
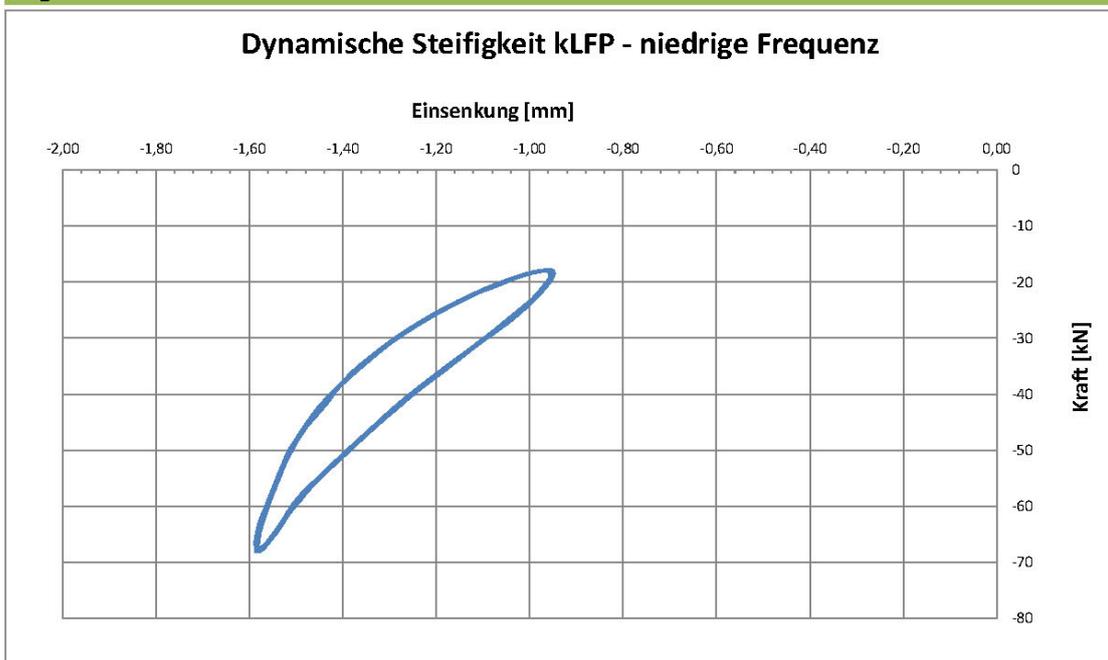
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,9	kN/mm
kLFP - 5 Hz	80,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,8	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1
Messwerte / Zyklus	26

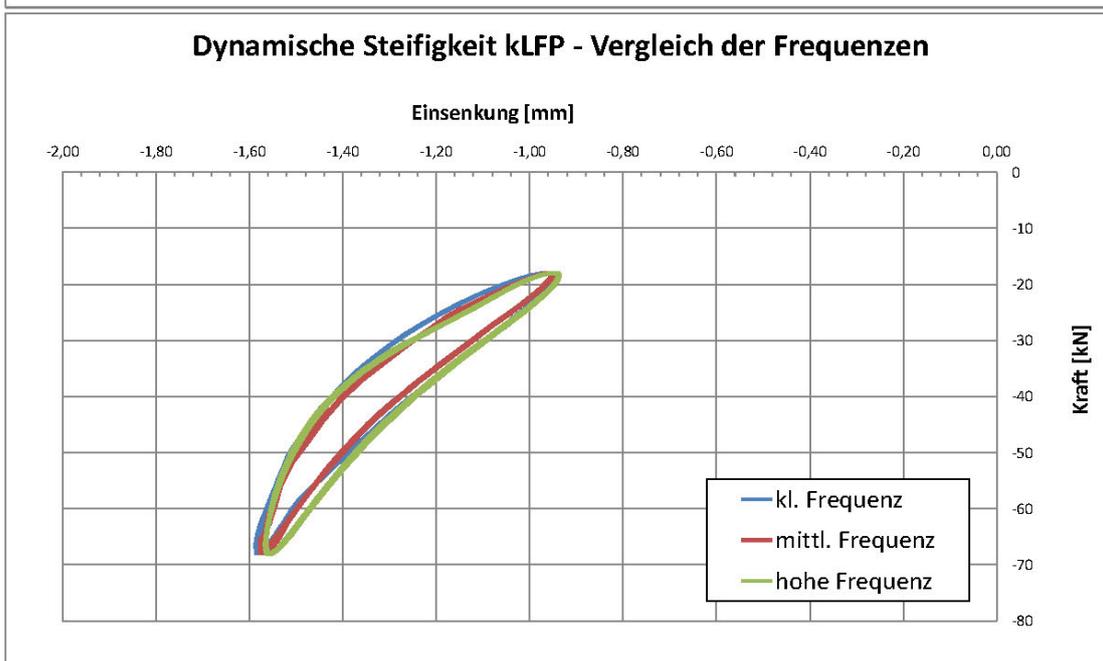
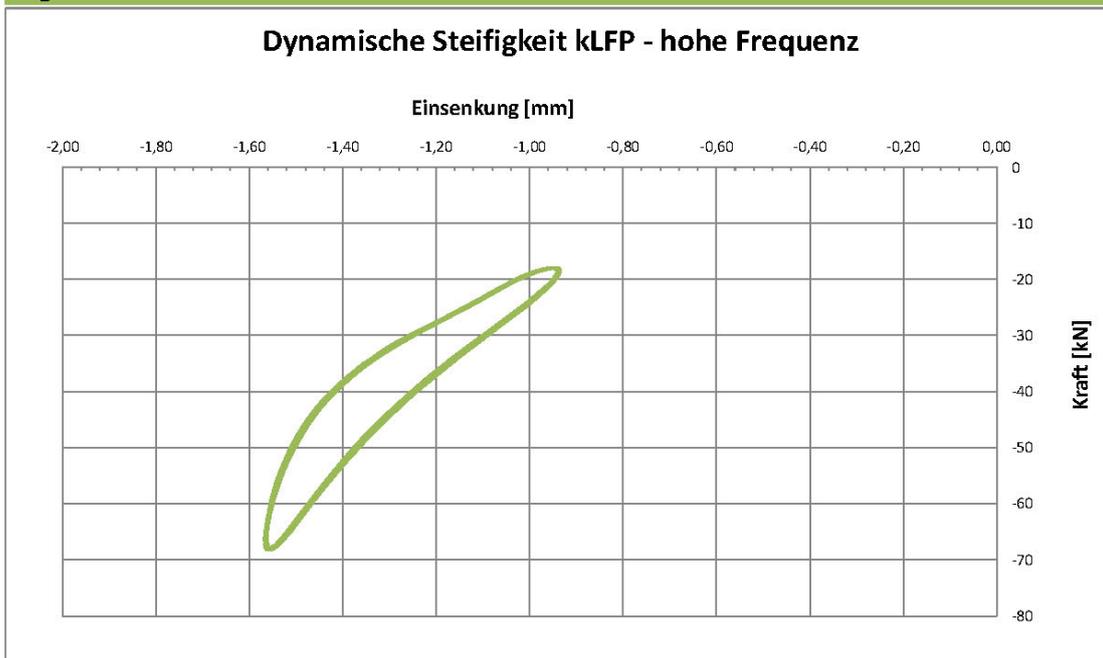
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,9	kN/mm
kLFP - 5 Hz	80,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	80,8	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_2
Messwerte / Zyklus	26

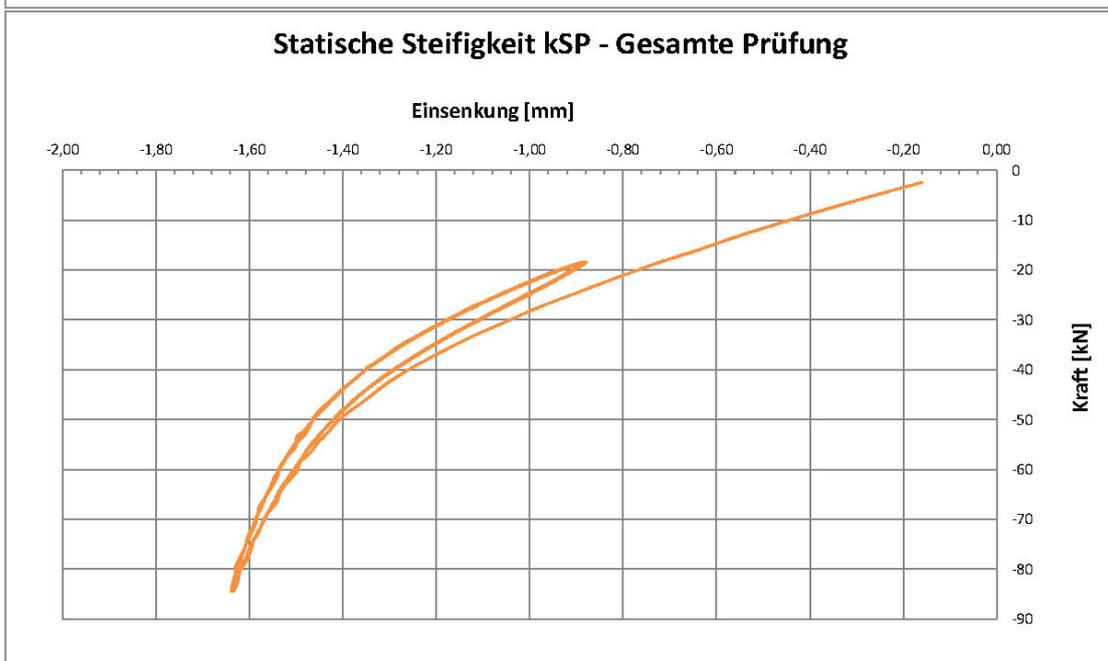
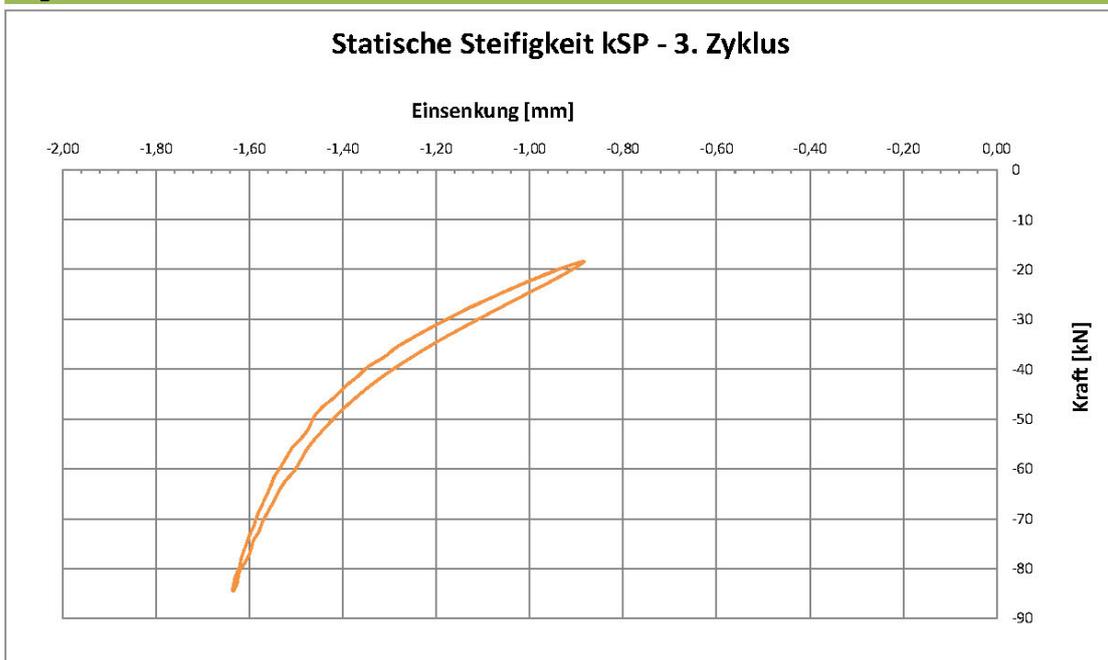
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	72,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	80,0	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	81,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

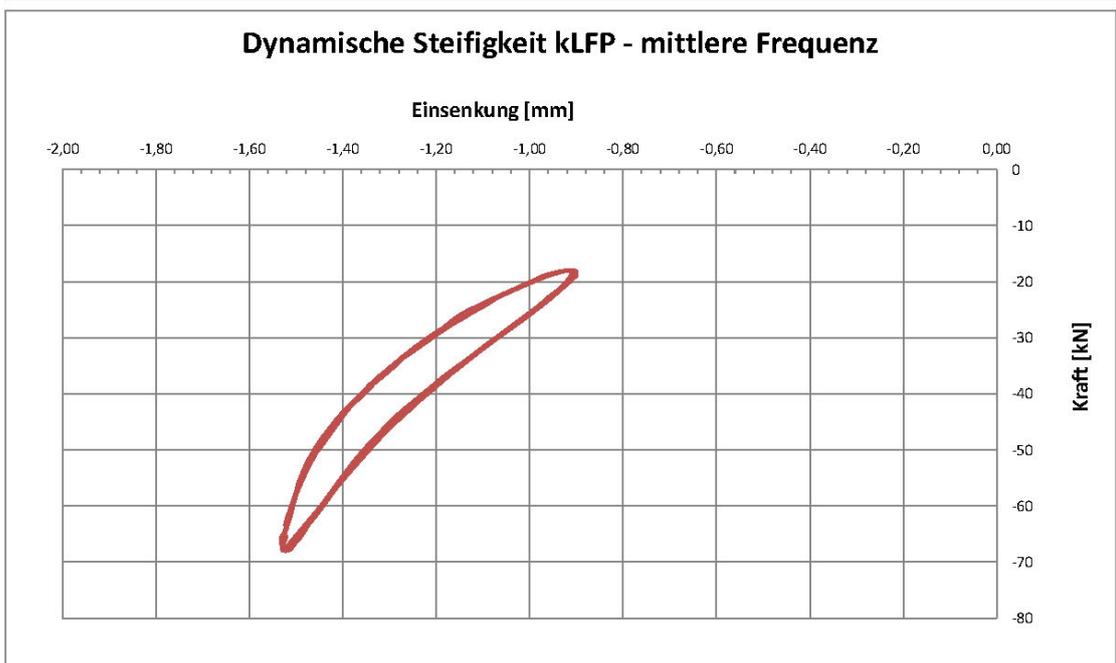
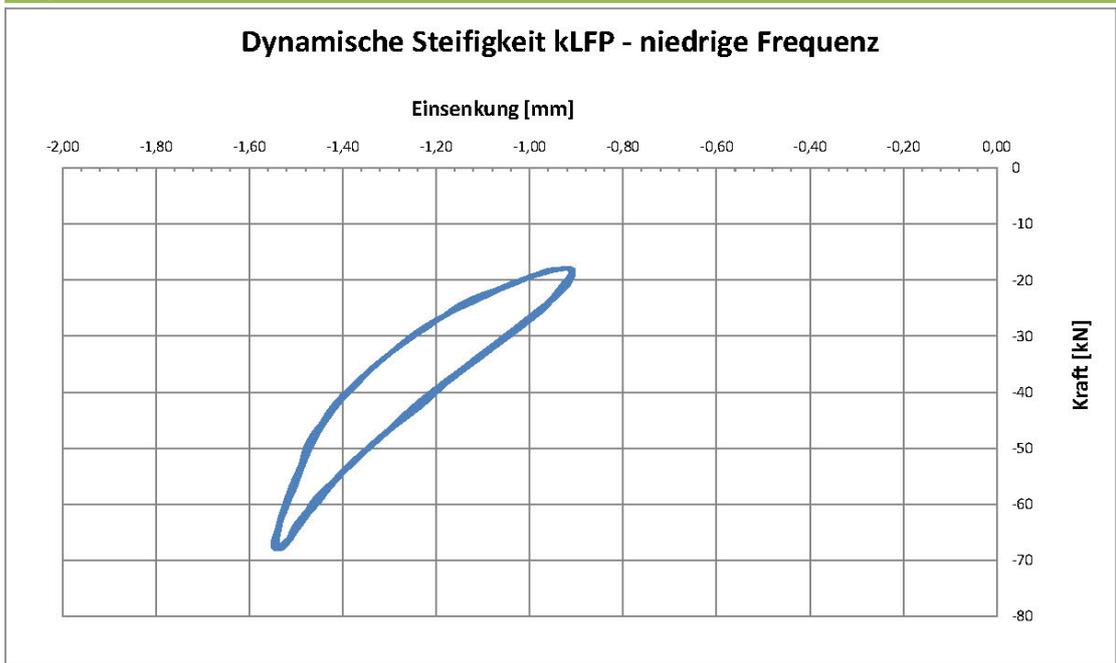
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_2
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	72,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	80,0	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	81,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_2
Messwerte / Zyklus	26

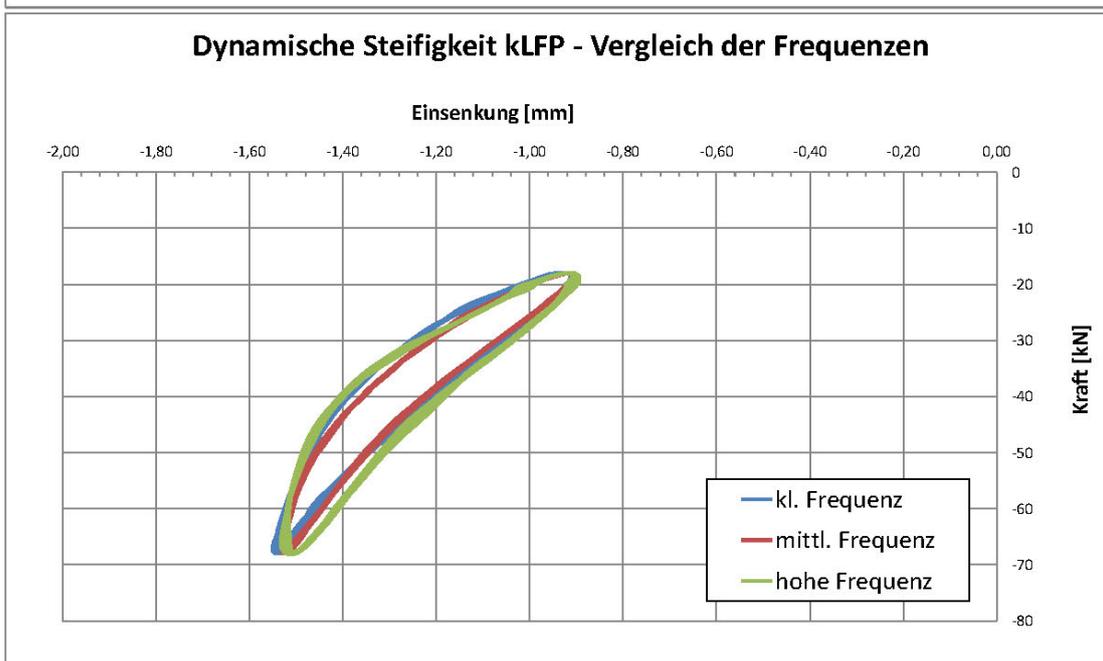
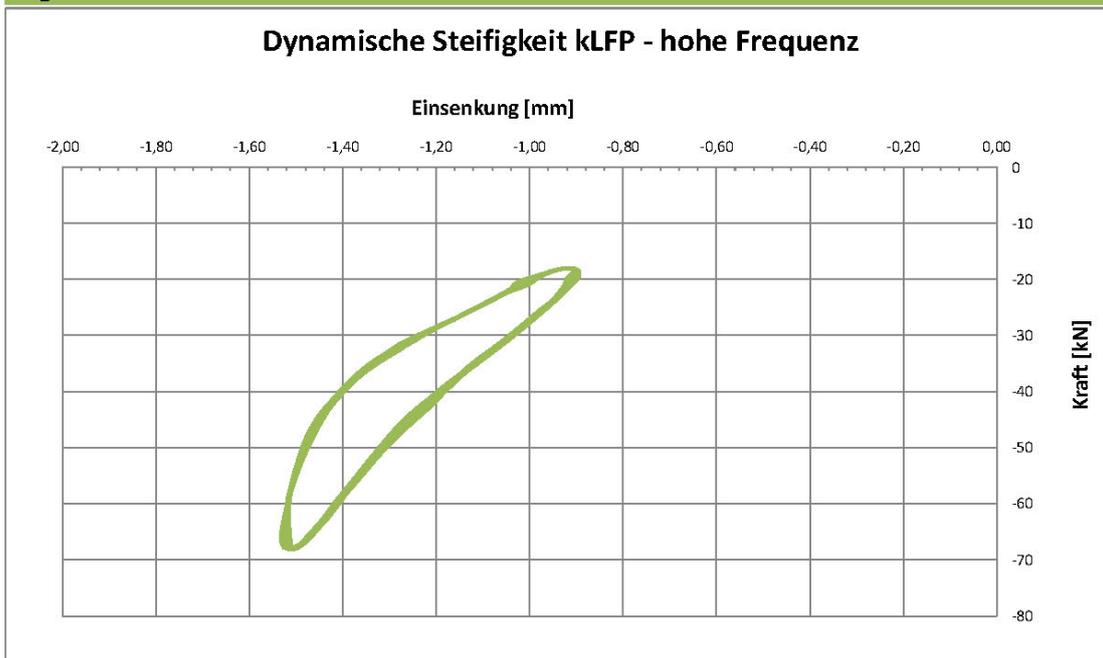
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	72,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	80,0	kN/mm
kLFP - 10 Hz	81,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	81,9	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

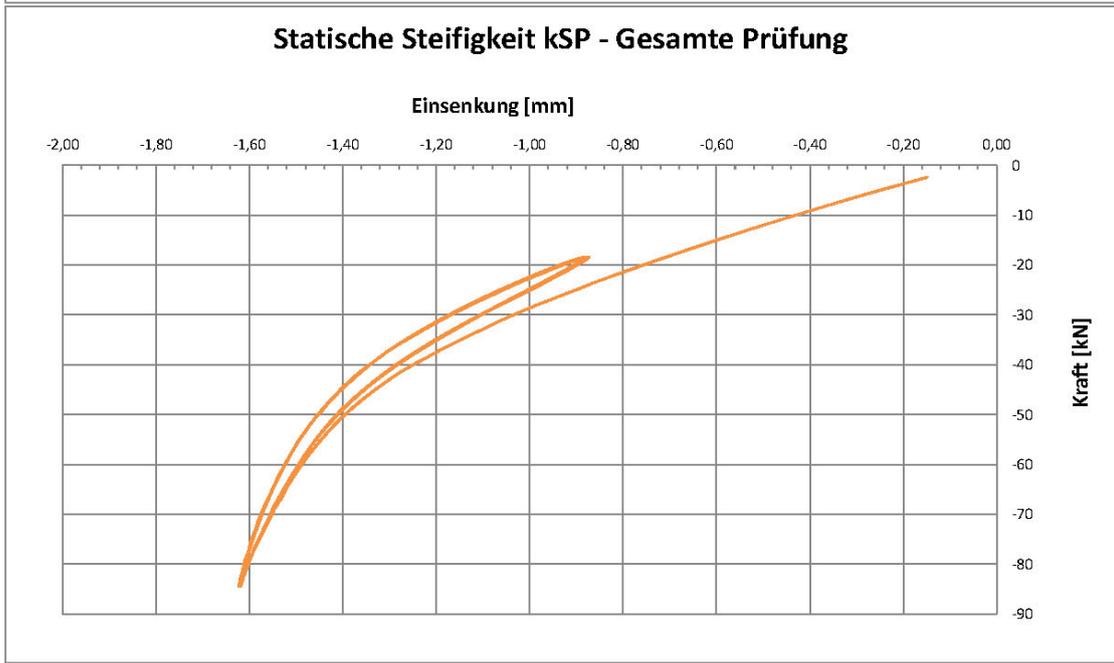
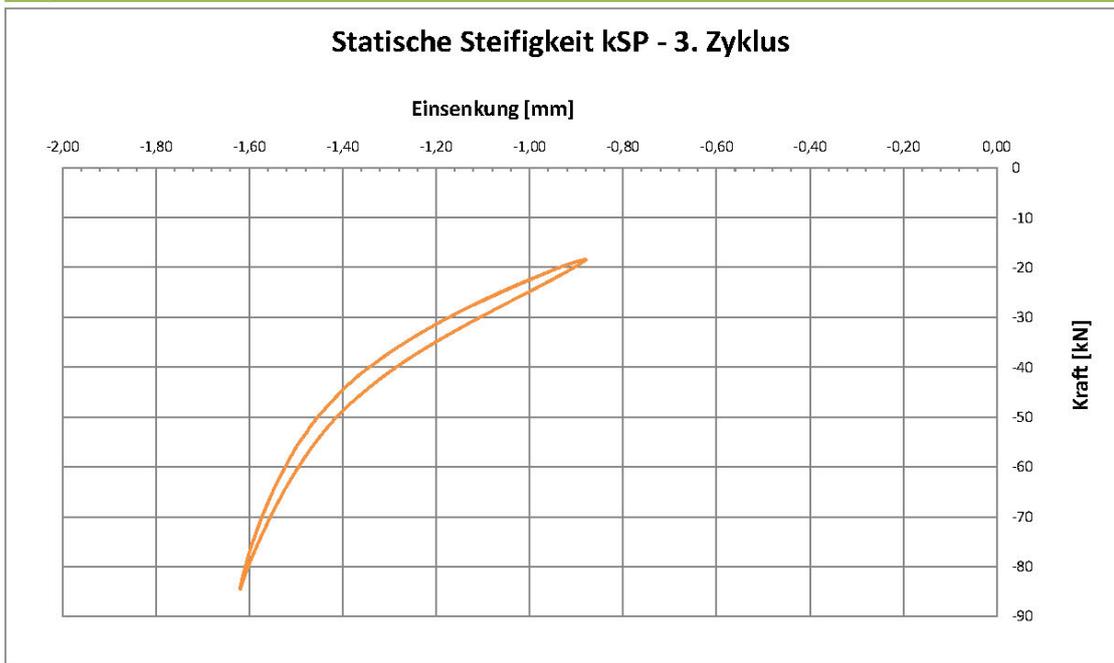
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_3
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,0	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,9	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,5	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_3
Messwerte / Zyklus	26

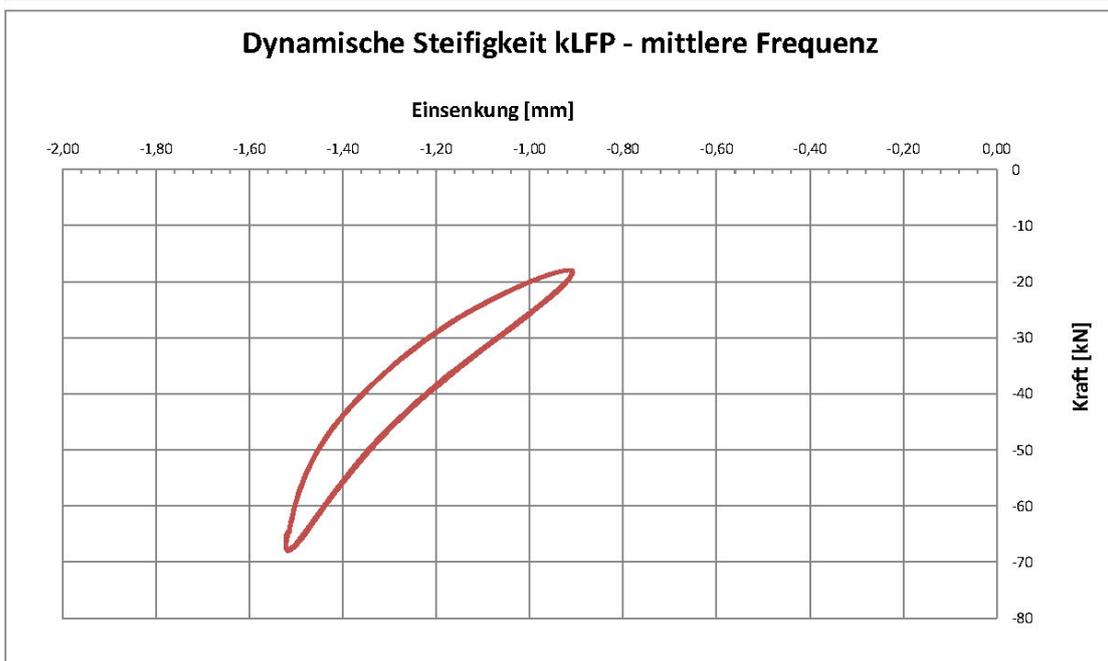
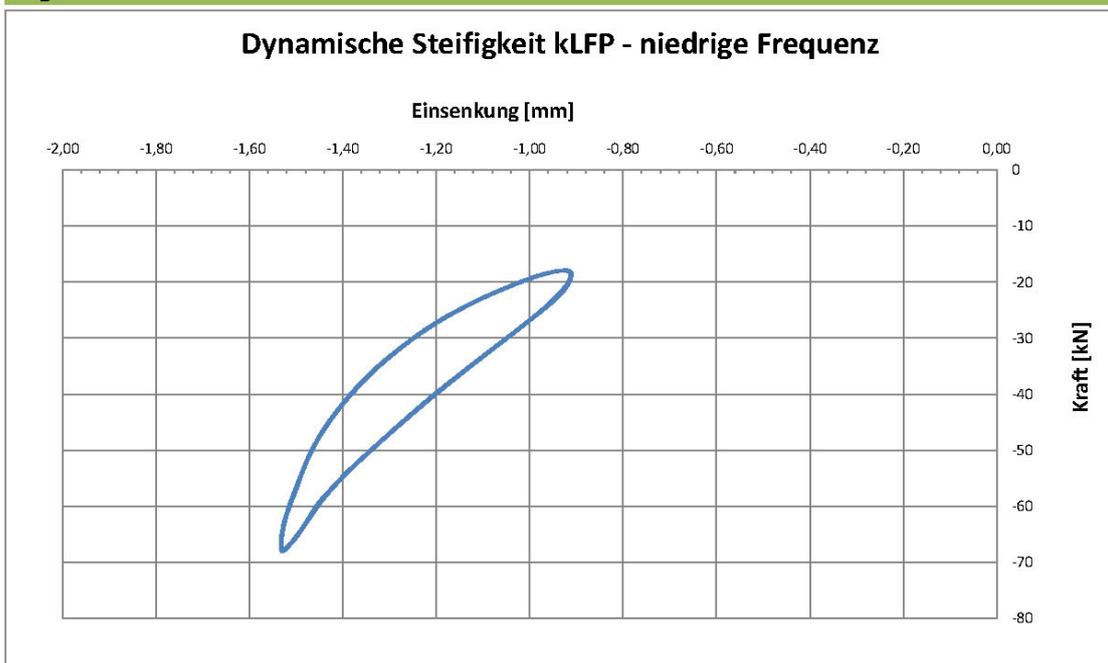
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,0	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,9	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,5	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	1_3
Messwerte / Zyklus	26

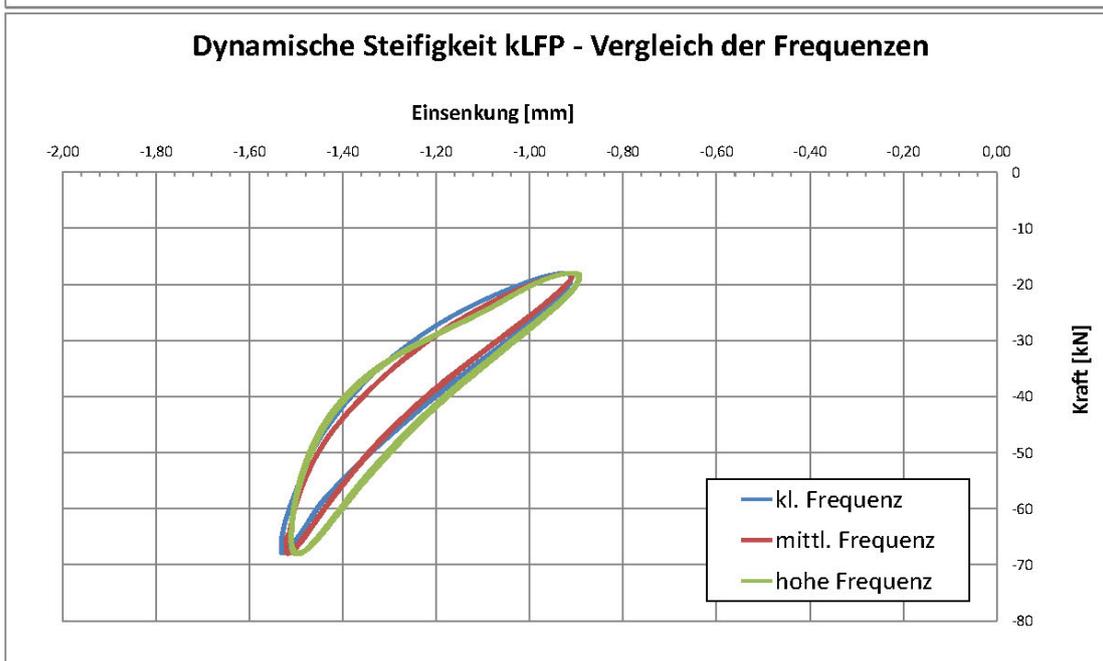
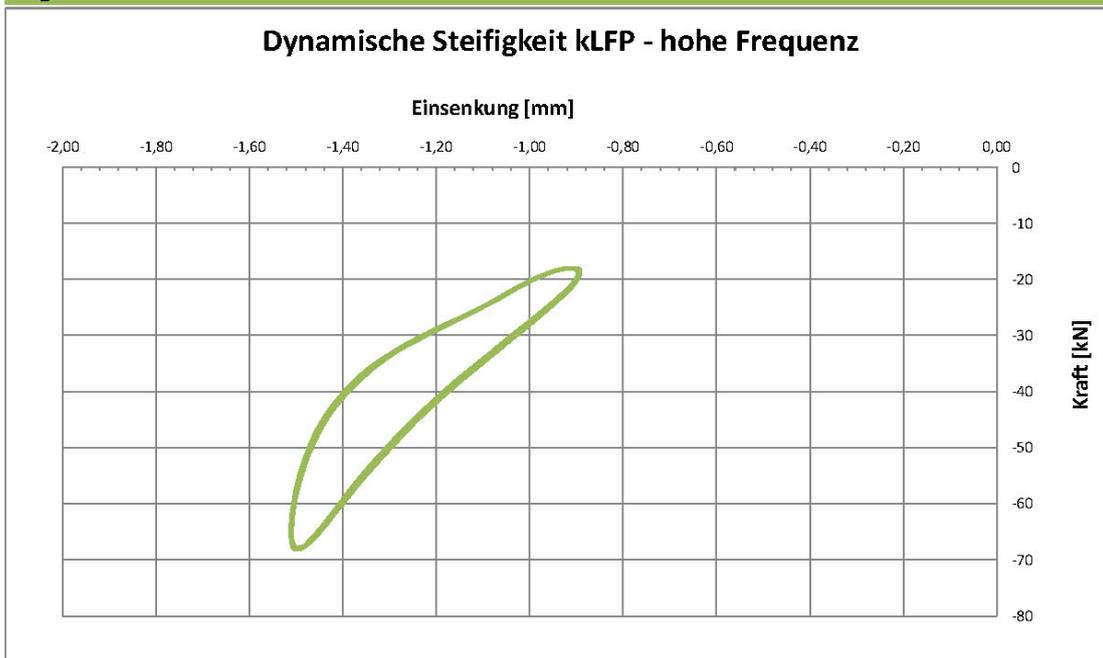
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,0	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,9	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,5	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	26

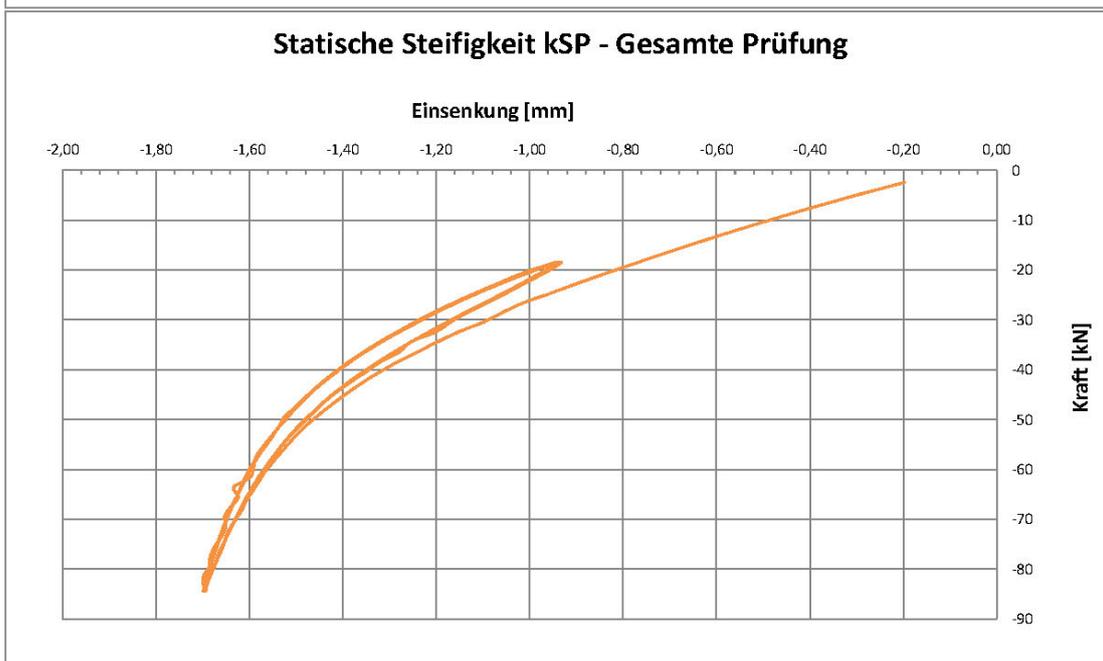
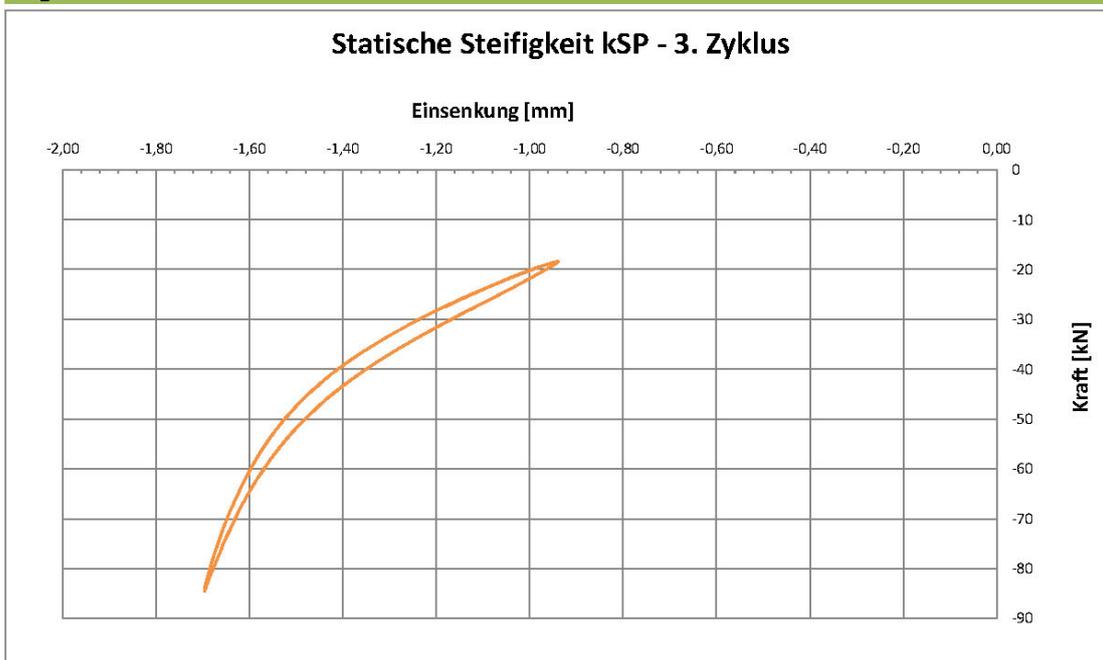
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	79,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	79,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	79,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	26

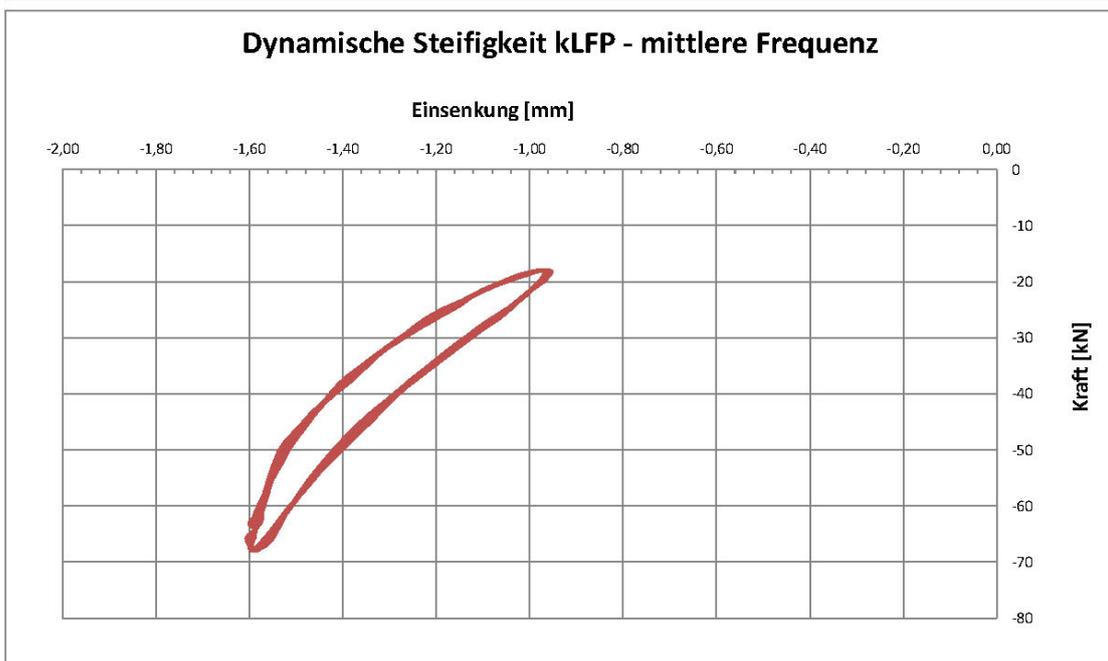
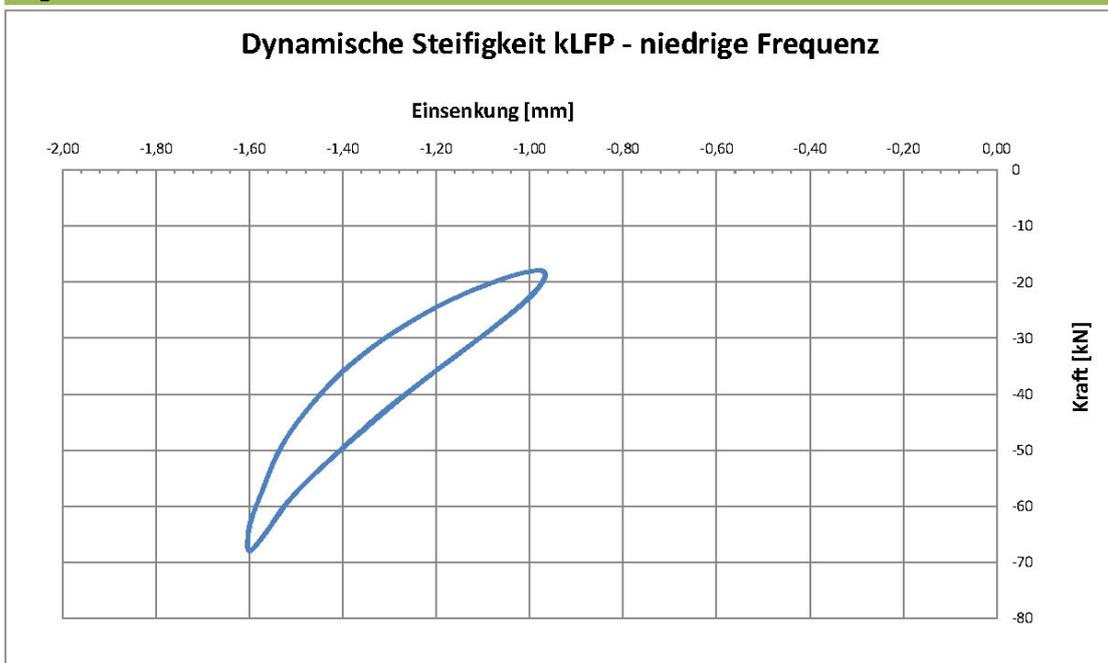
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	79,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	79,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	79,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

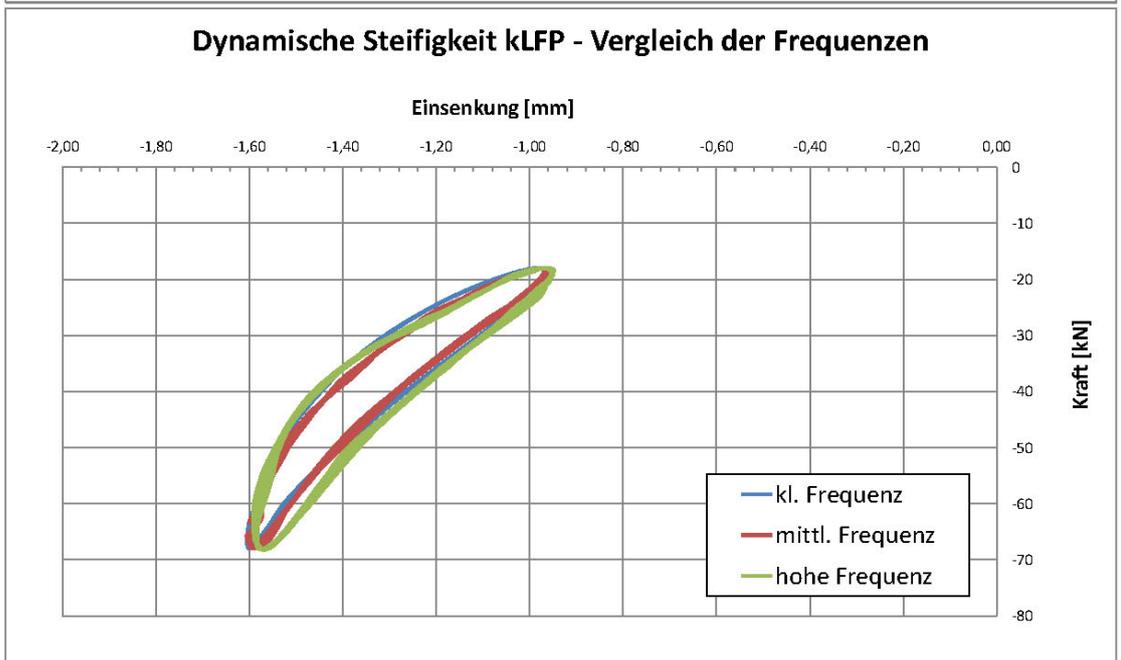
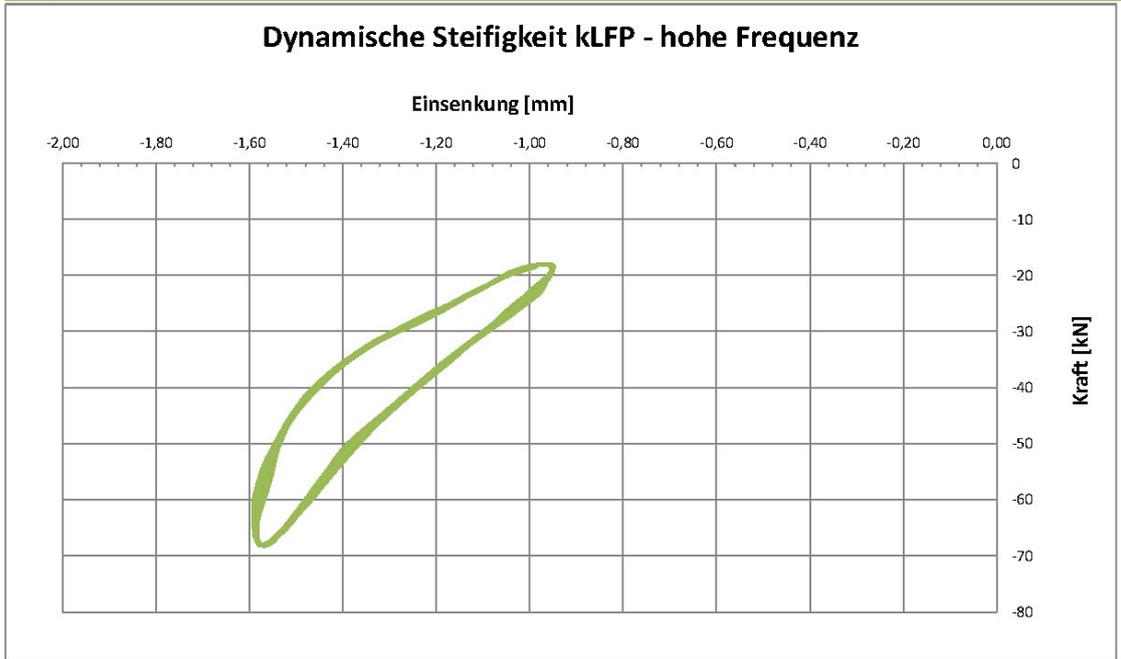
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	2
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	73,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	79,6	kN/mm
kLFP - 10 Hz	79,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	79,6	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	3
Messwerte / Zyklus	26

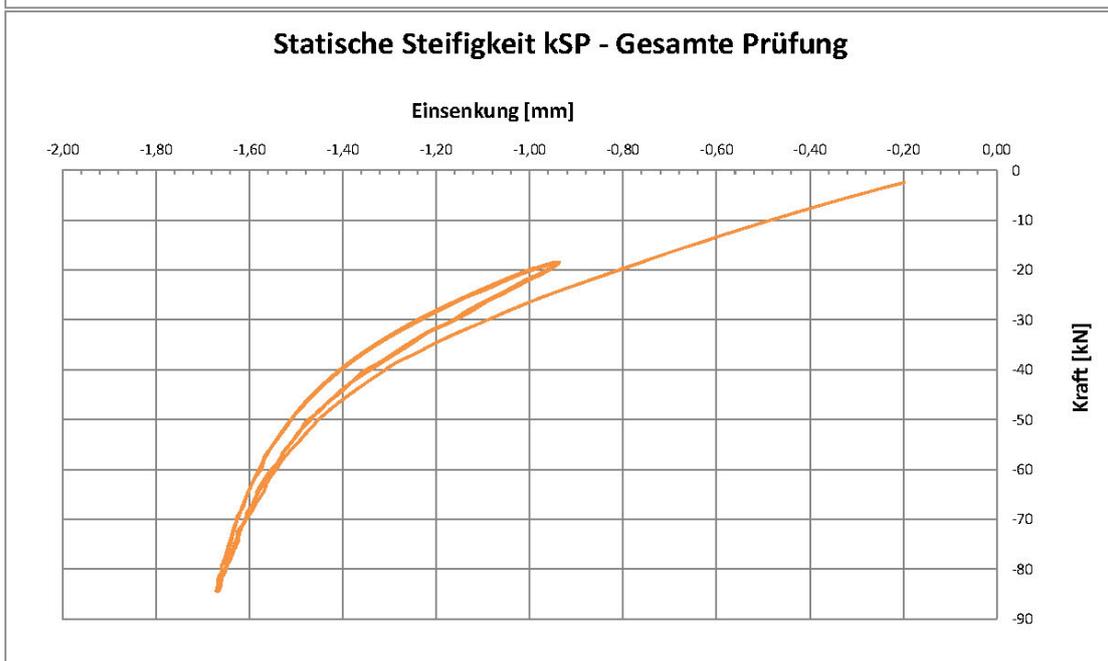
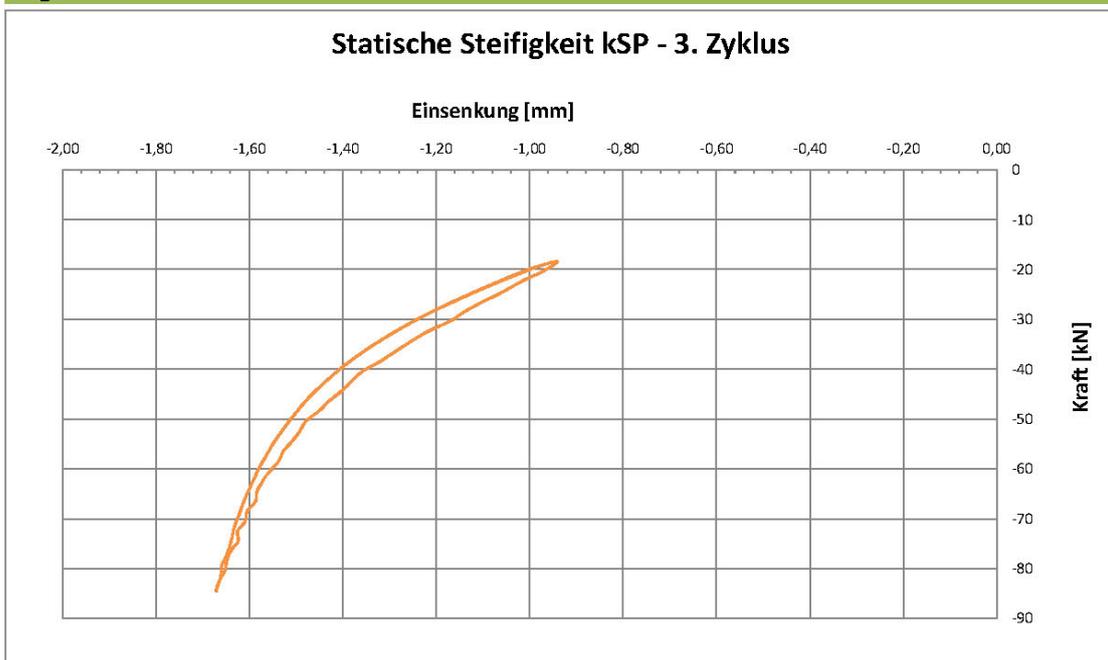
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	83,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	3
Messwerte / Zyklus	26

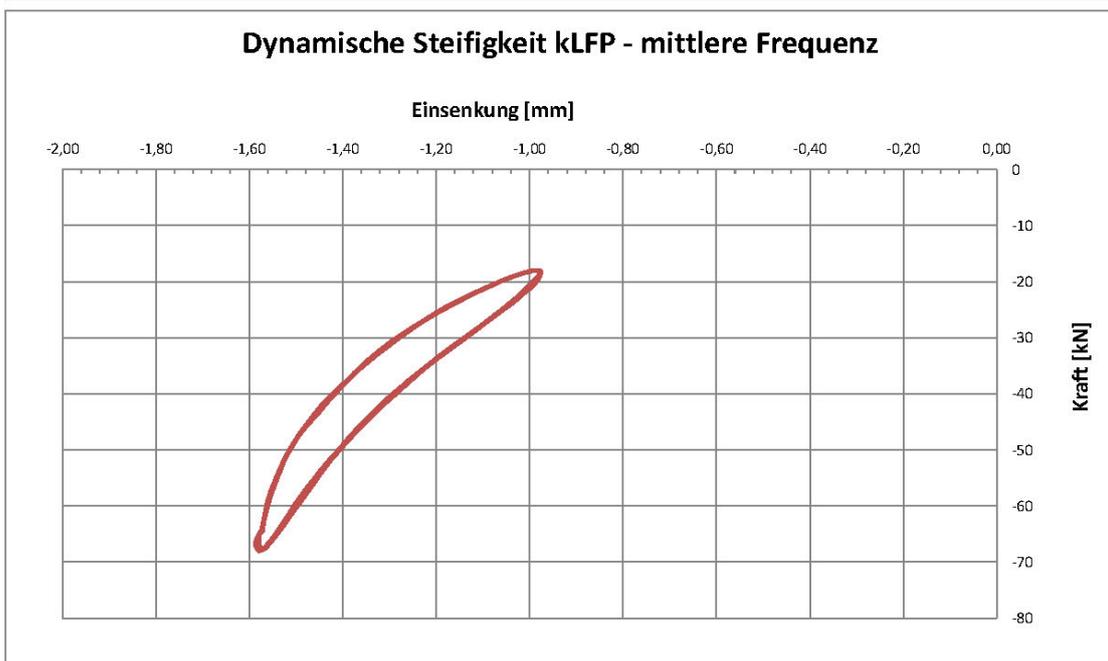
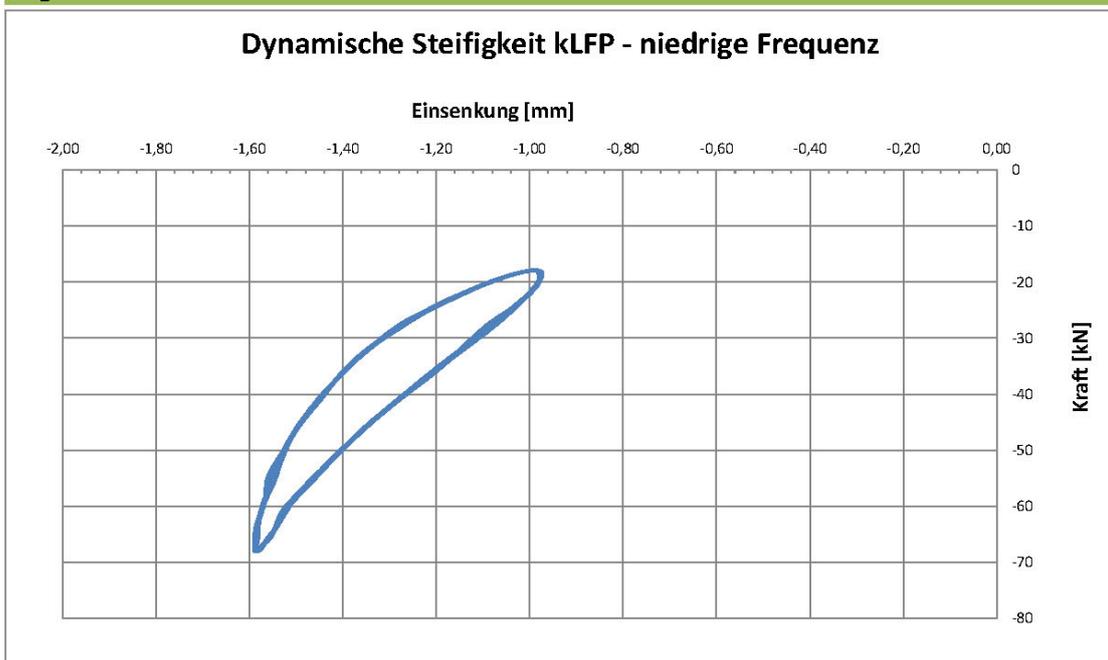
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	83,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

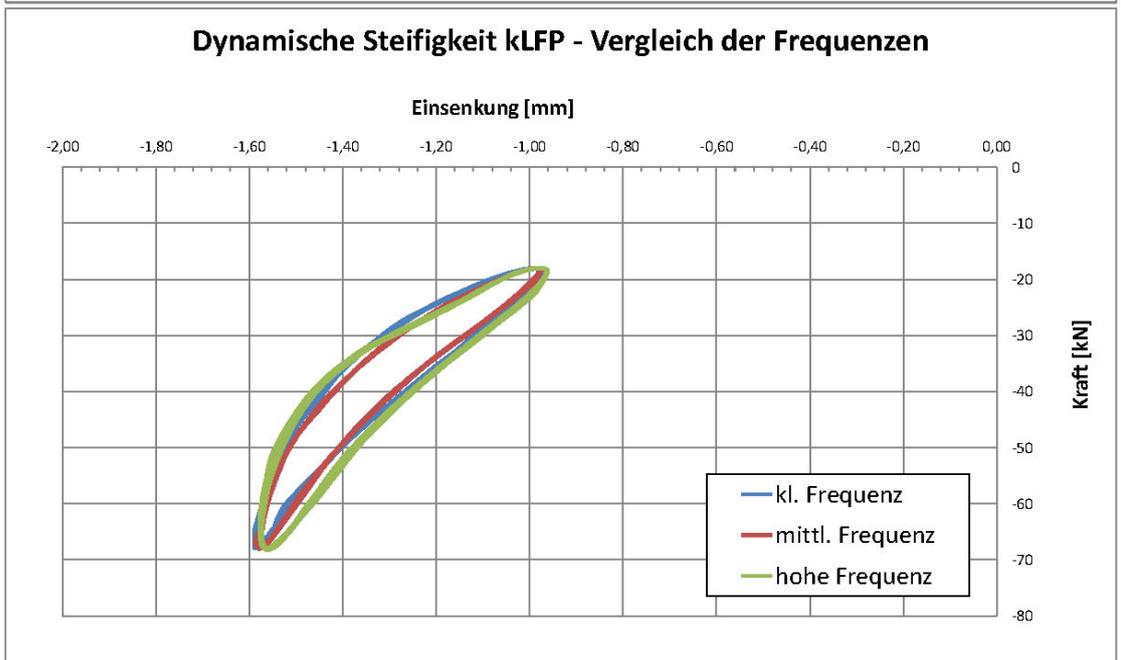
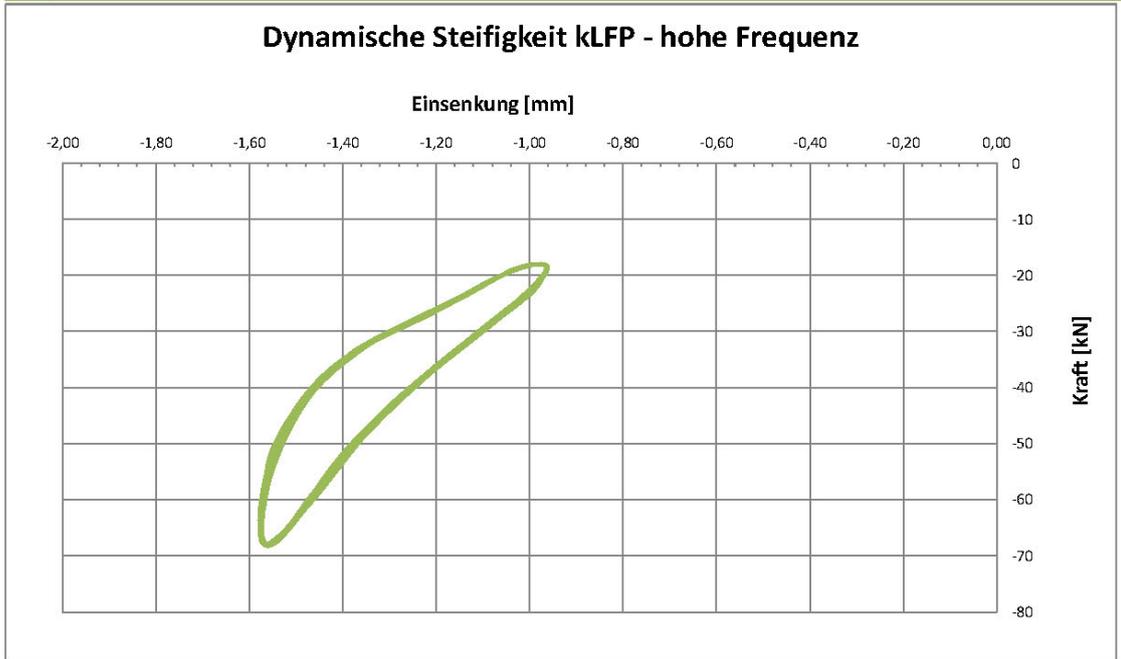
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	3
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	83,0	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	4
Messwerte / Zyklus	26

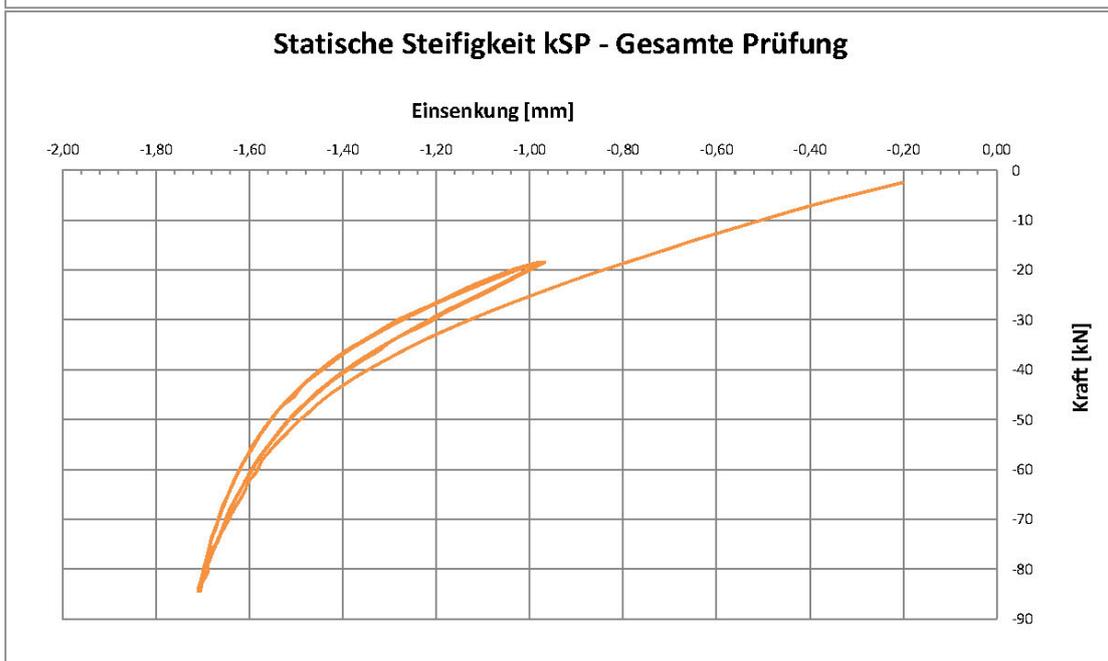
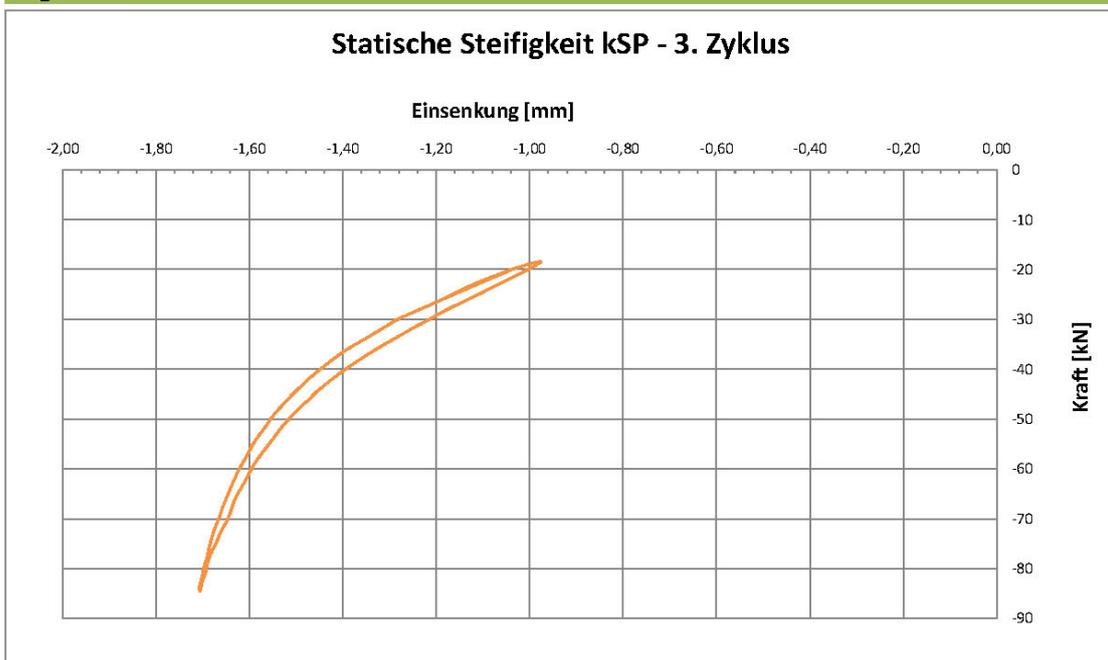
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	74,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

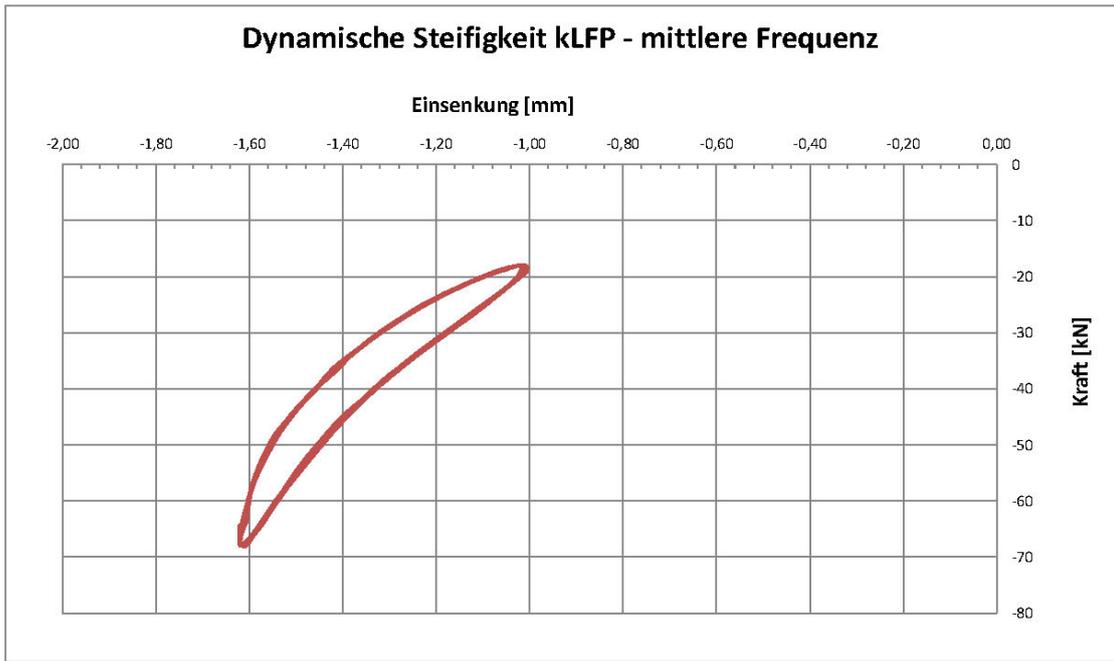
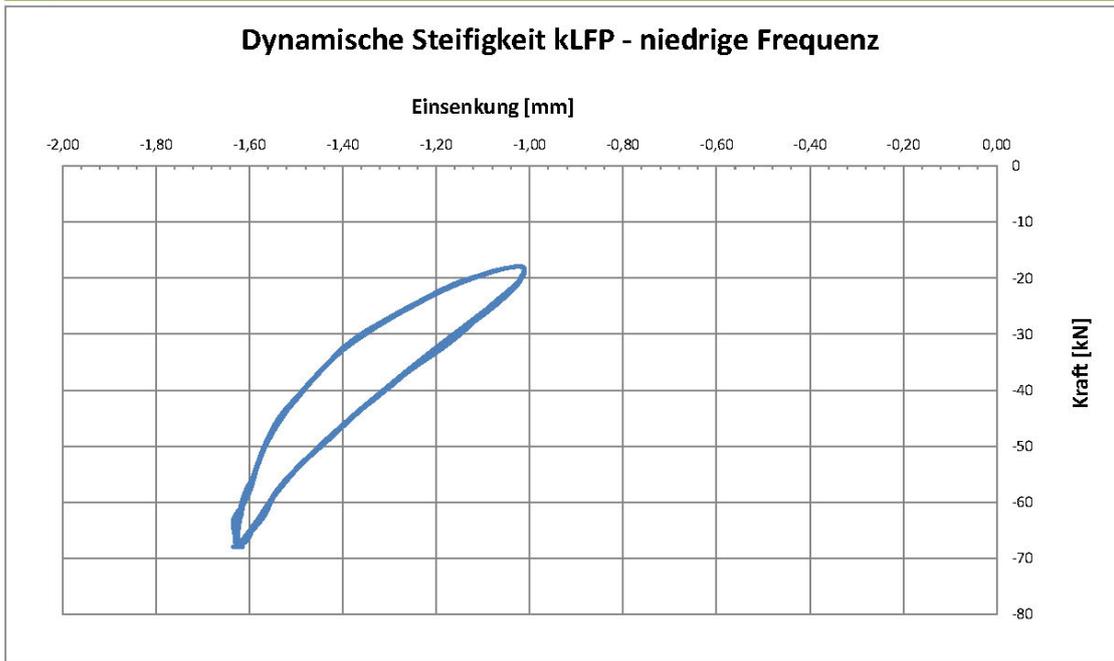
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	4
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	74,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	4
Messwerte / Zyklus	26

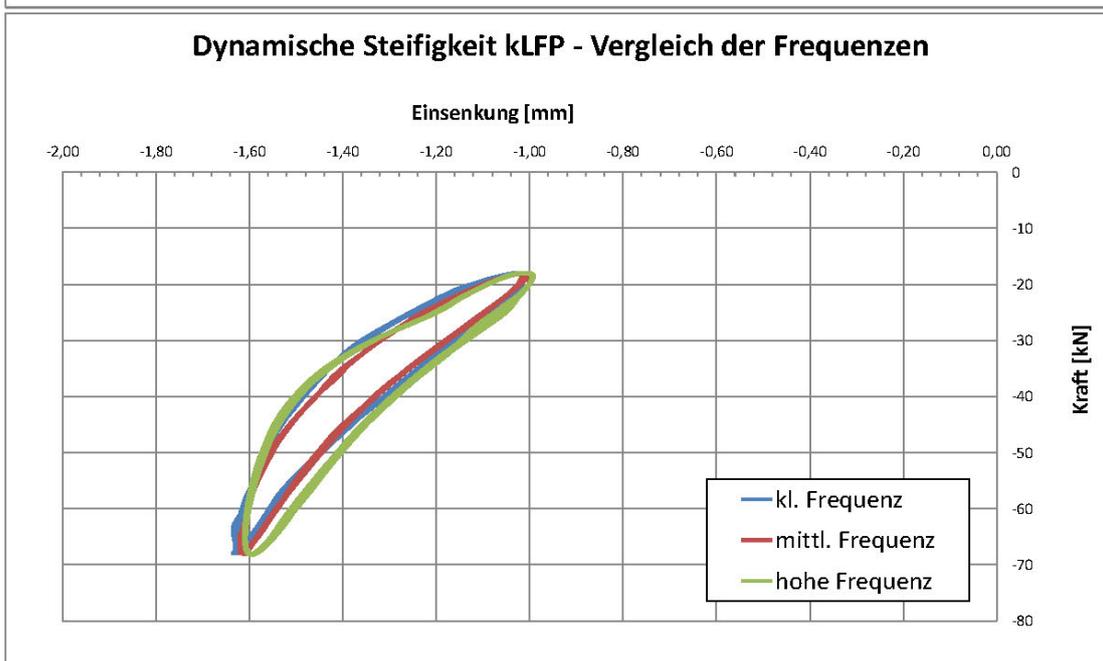
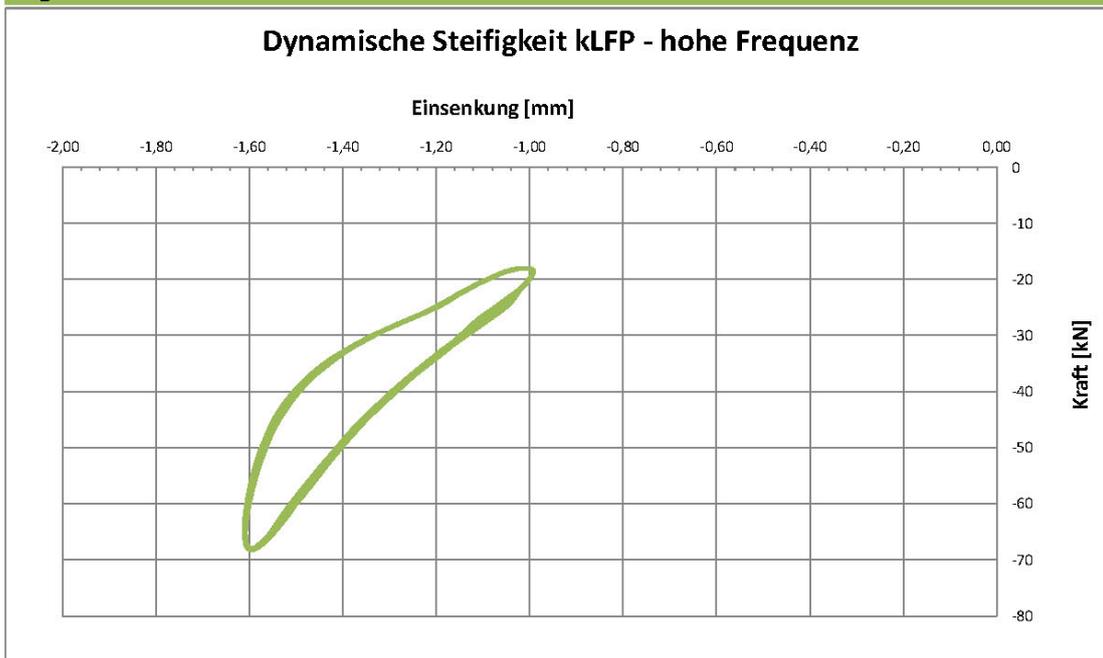
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	74,4	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,8	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,1	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,4	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

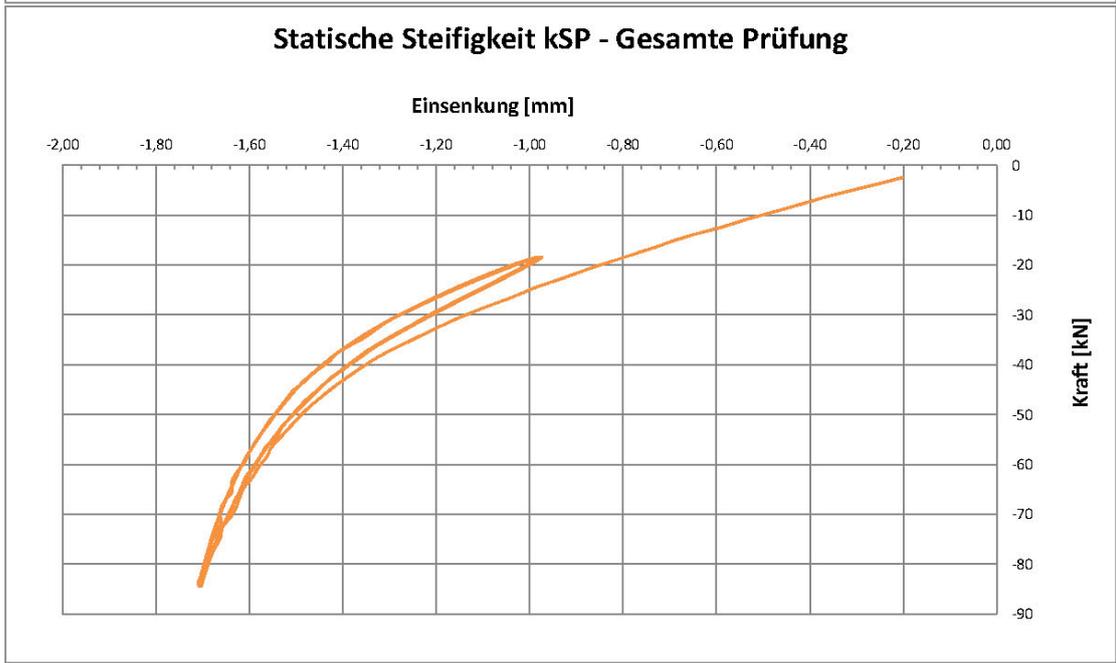
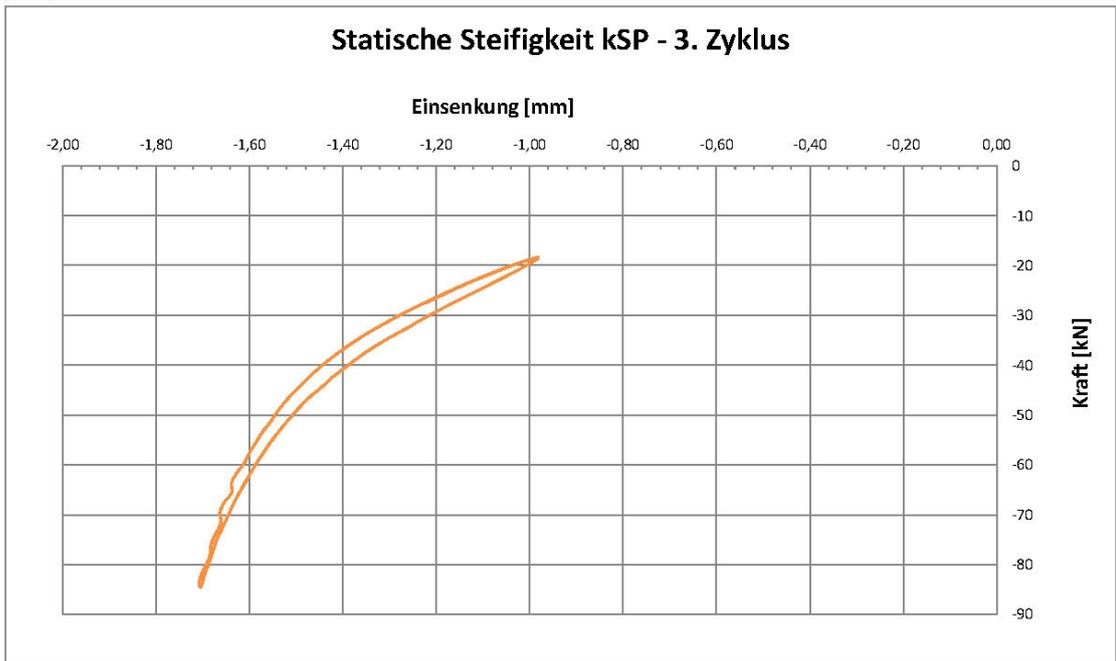
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	5
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	5
Messwerte / Zyklus	26

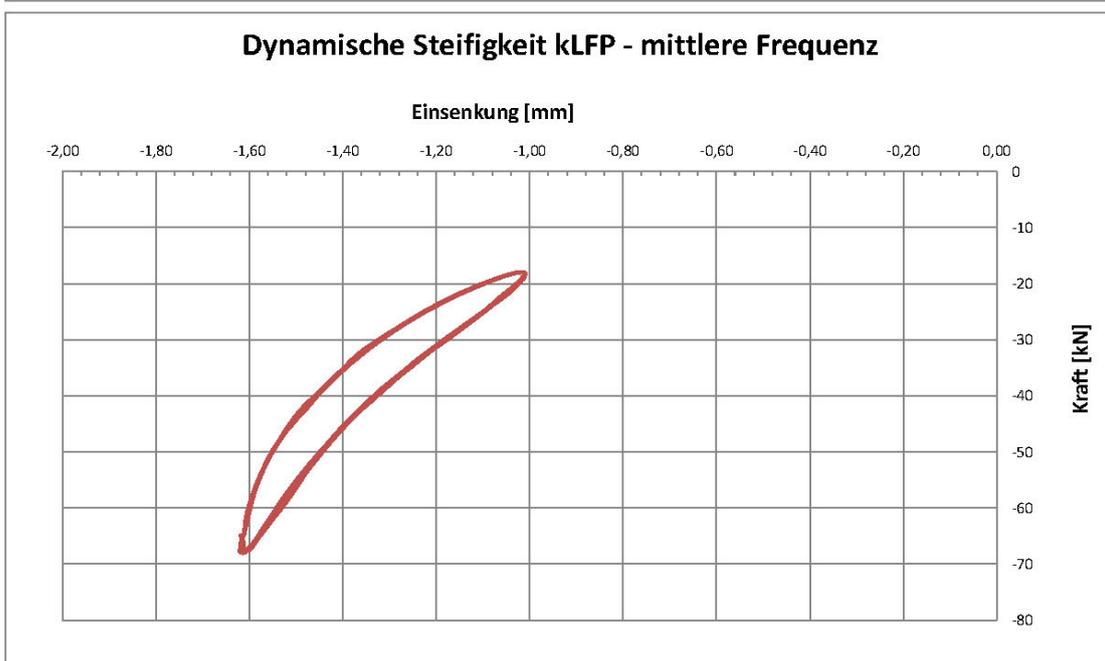
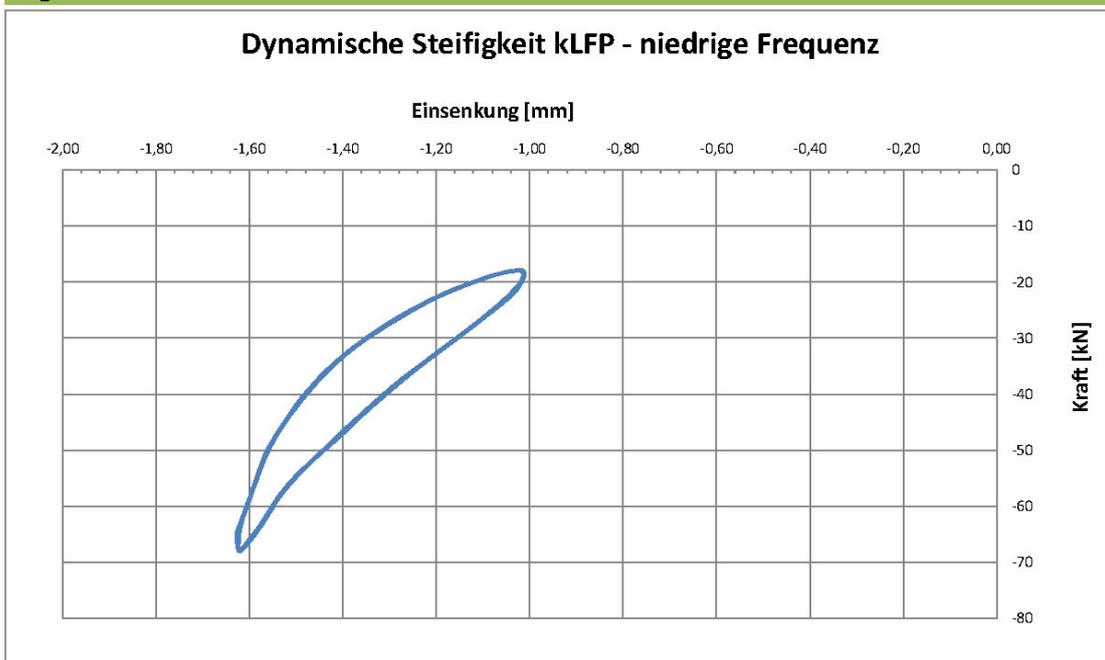
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	5
Messwerte / Zyklus	26

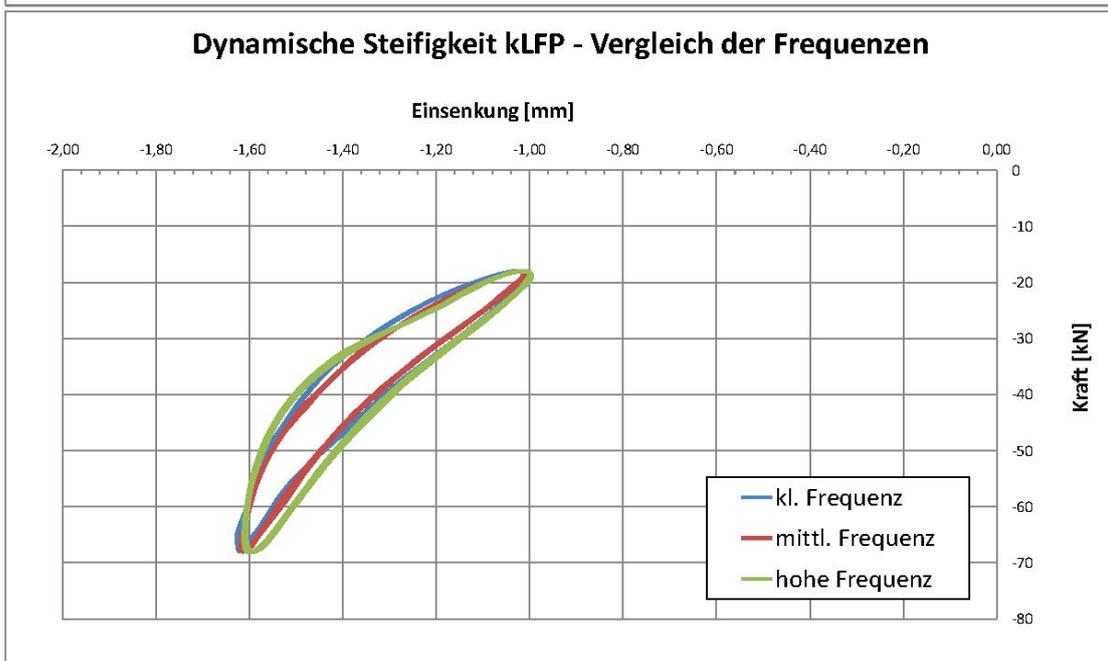
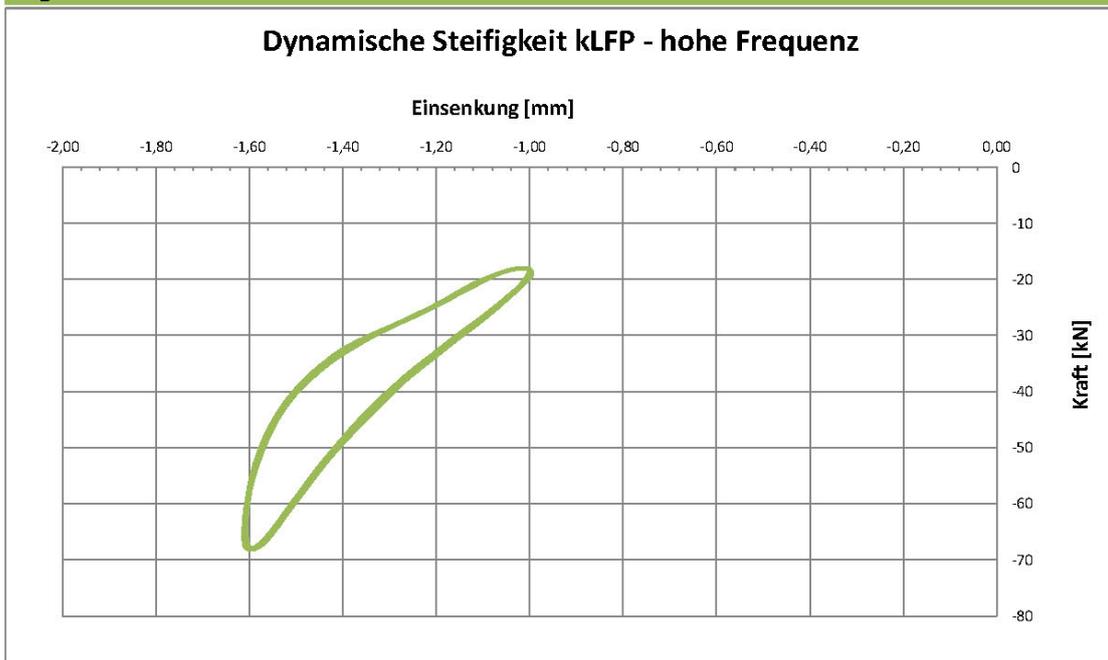
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,2	kN/mm
kLFP - 5 Hz	82,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	83,3	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,7	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

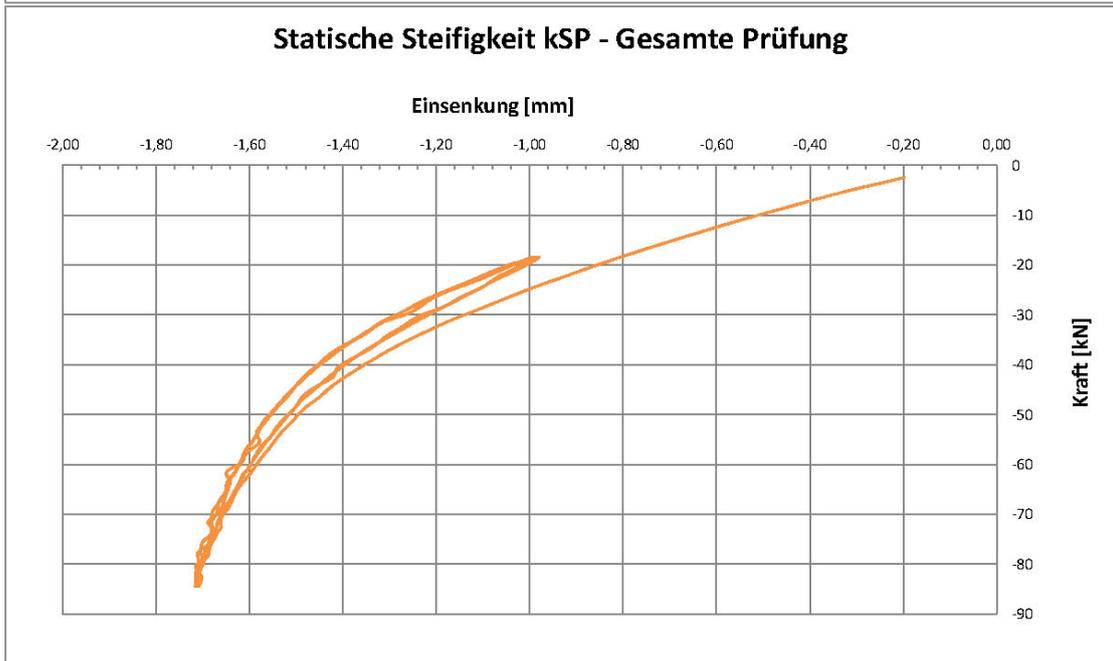
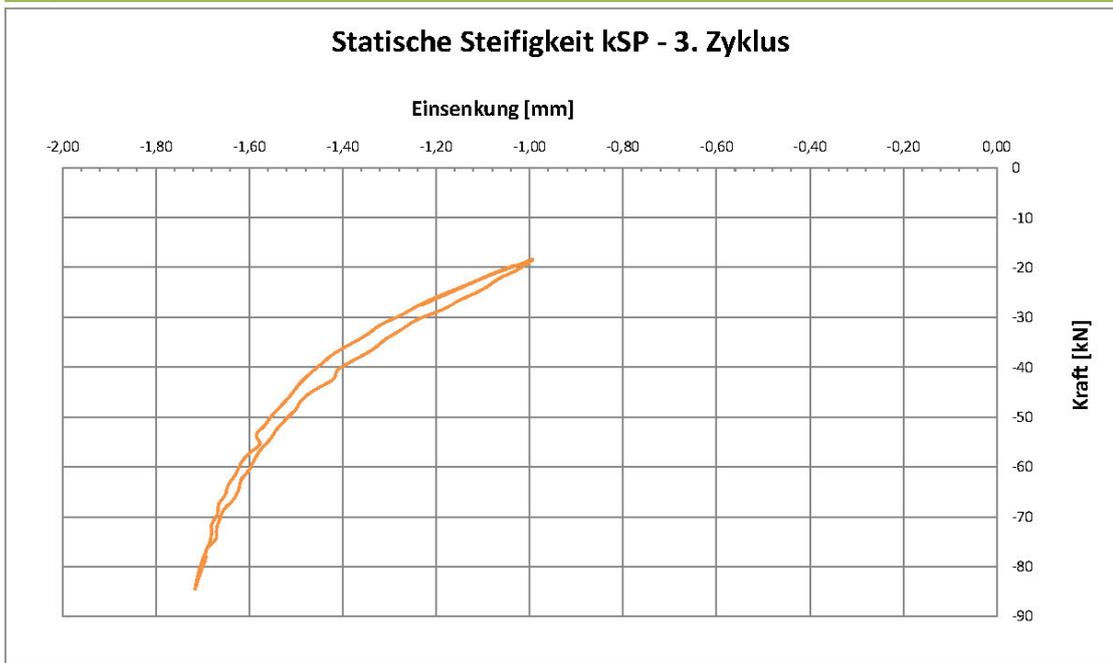
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	6
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,9	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,4	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,5	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	6
Messwerte / Zyklus	26

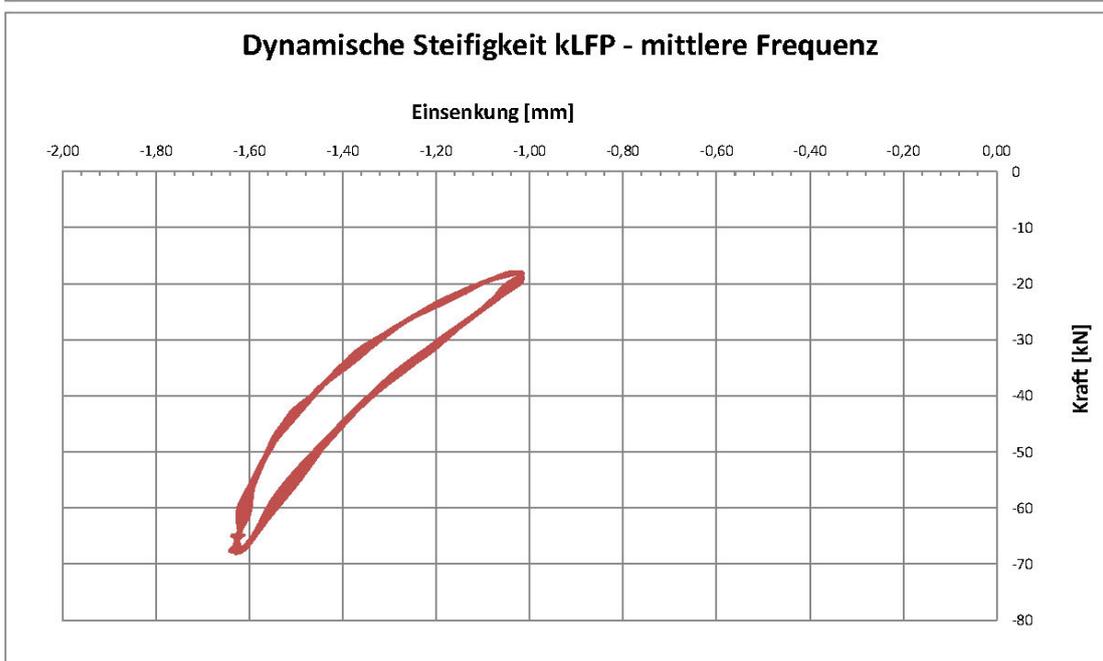
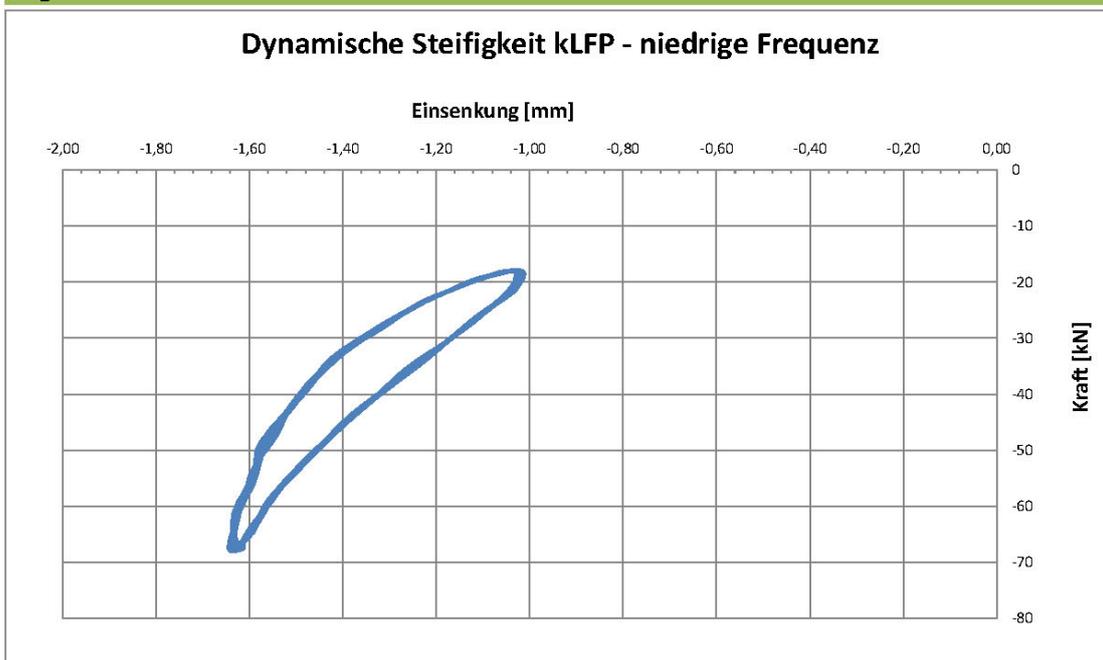
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,9	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,4	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,5	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	6
Messwerte / Zyklus	26

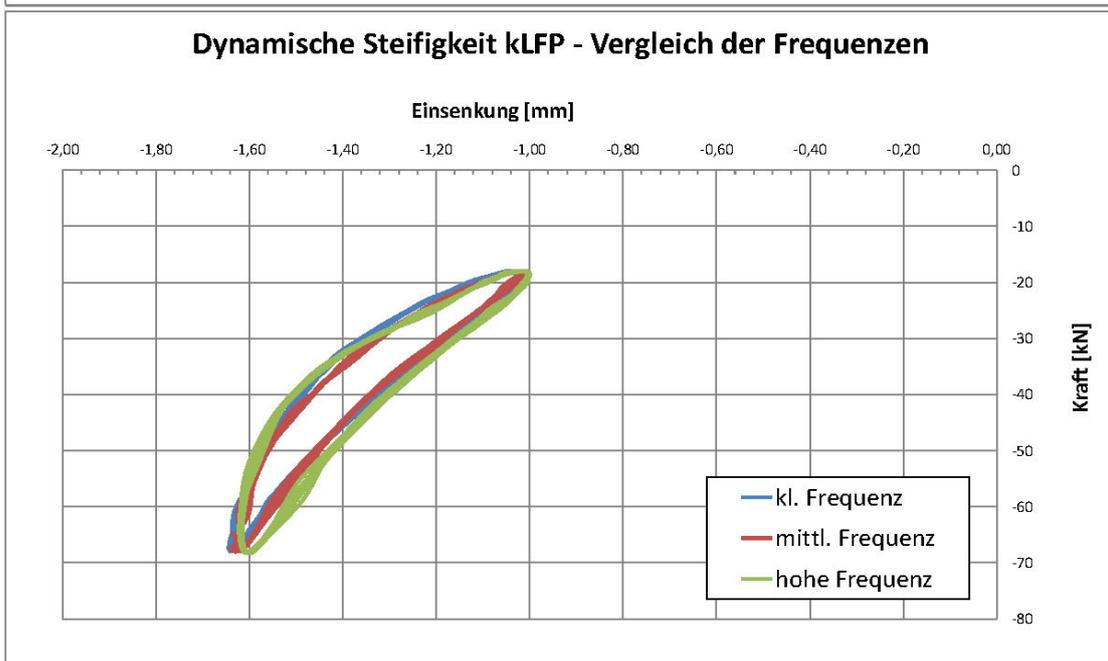
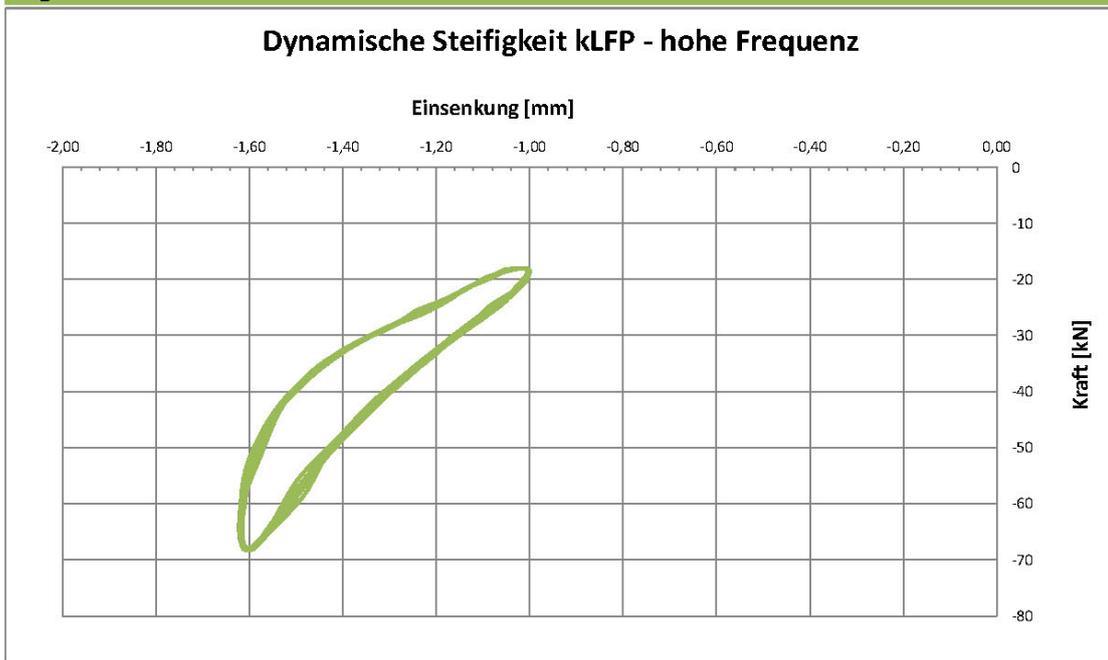
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	75,9	kN/mm
kLFP - 5 Hz	81,5	kN/mm
kLFP - 10 Hz	82,4	kN/mm
kLFP - 20 Hz	82,5	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	7
Messwerte / Zyklus	26

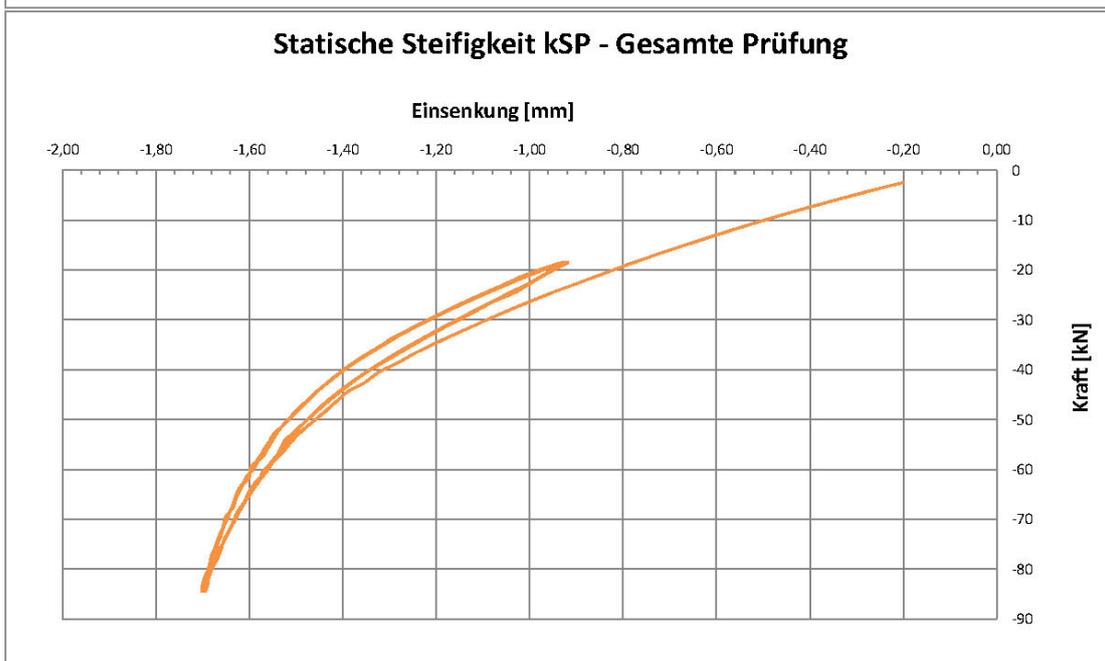
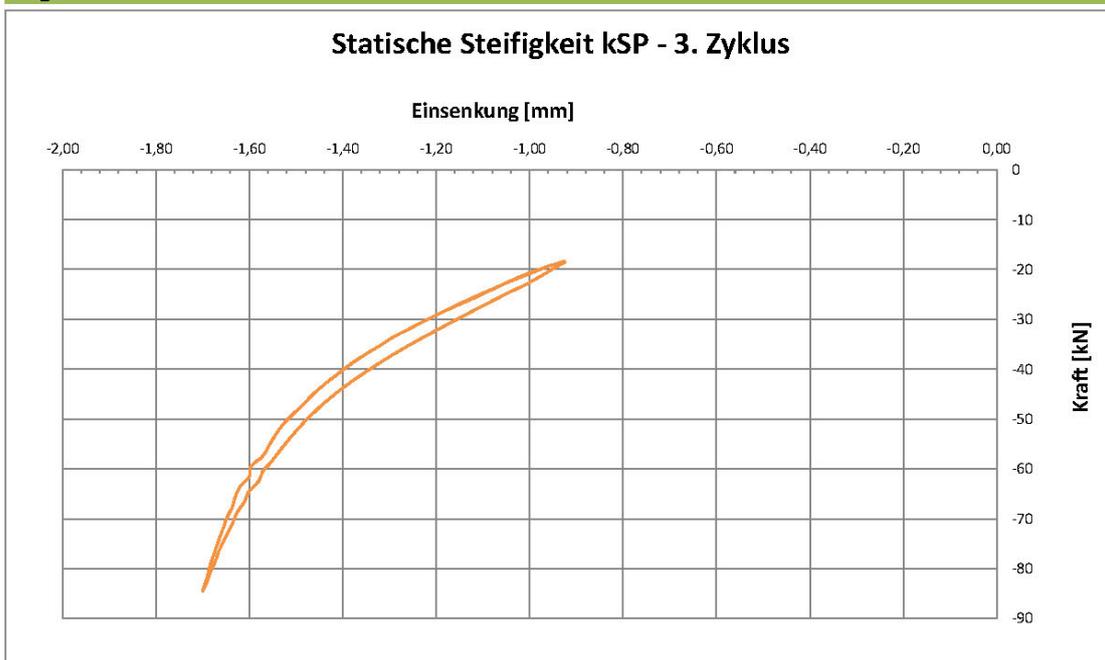
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	71,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,1	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	78,3	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	7
Messwerte / Zyklus	26

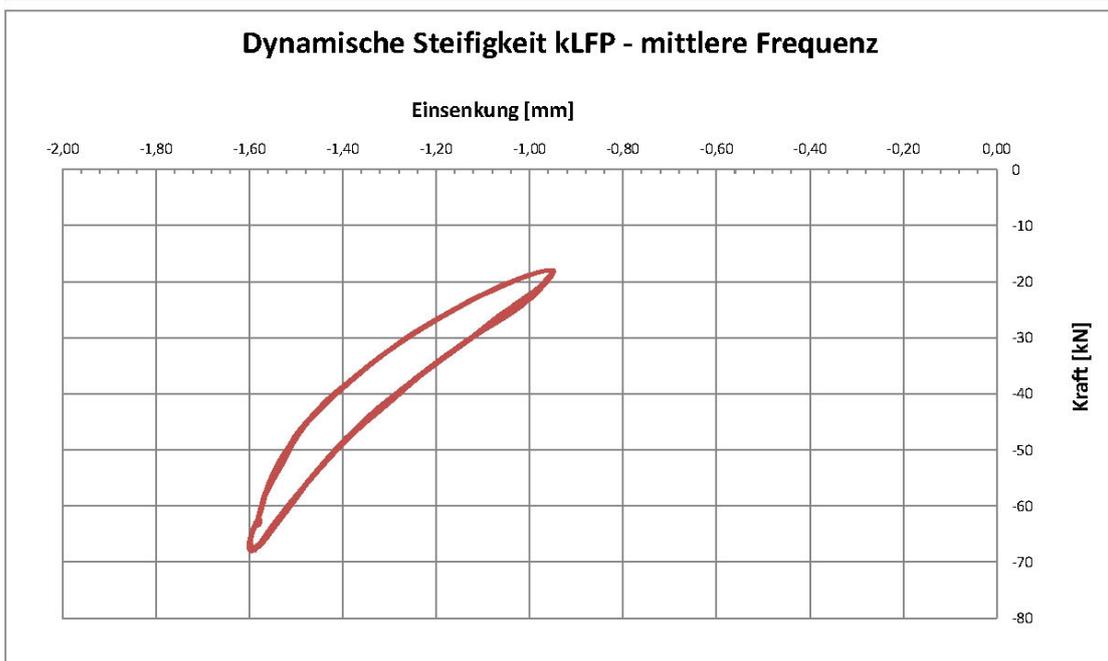
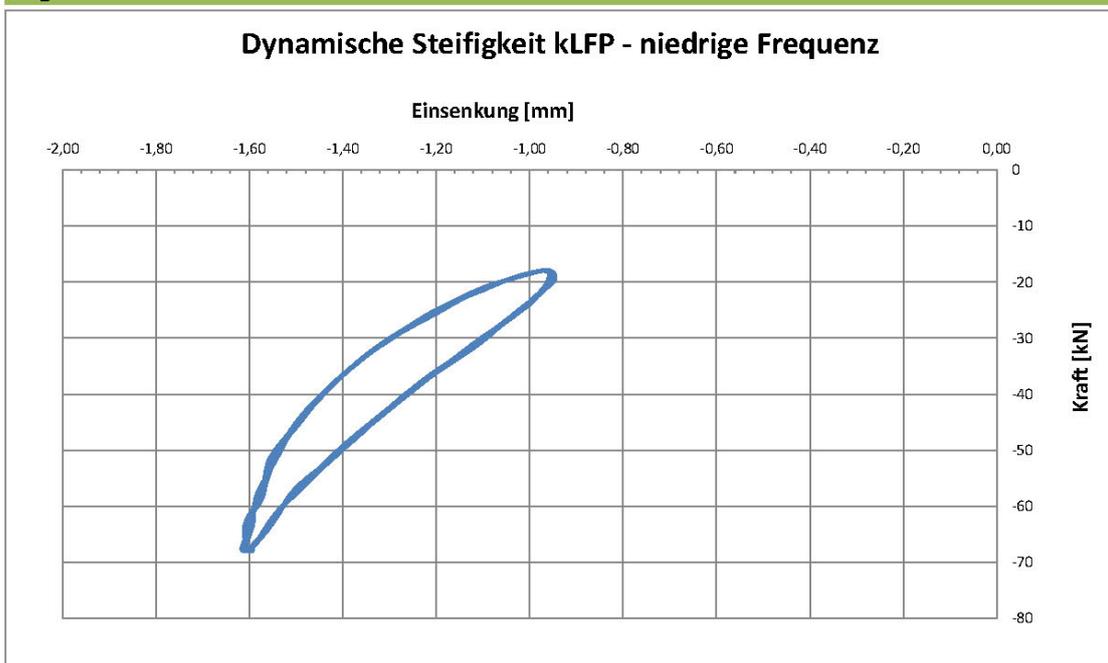
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	71,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,1	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	78,3	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

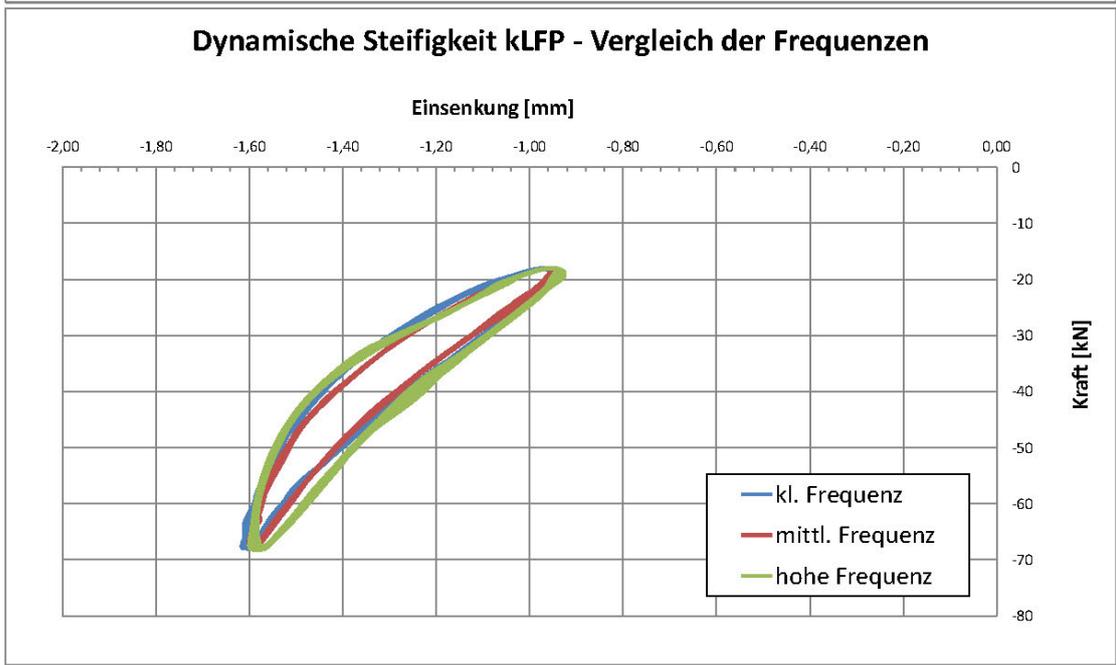
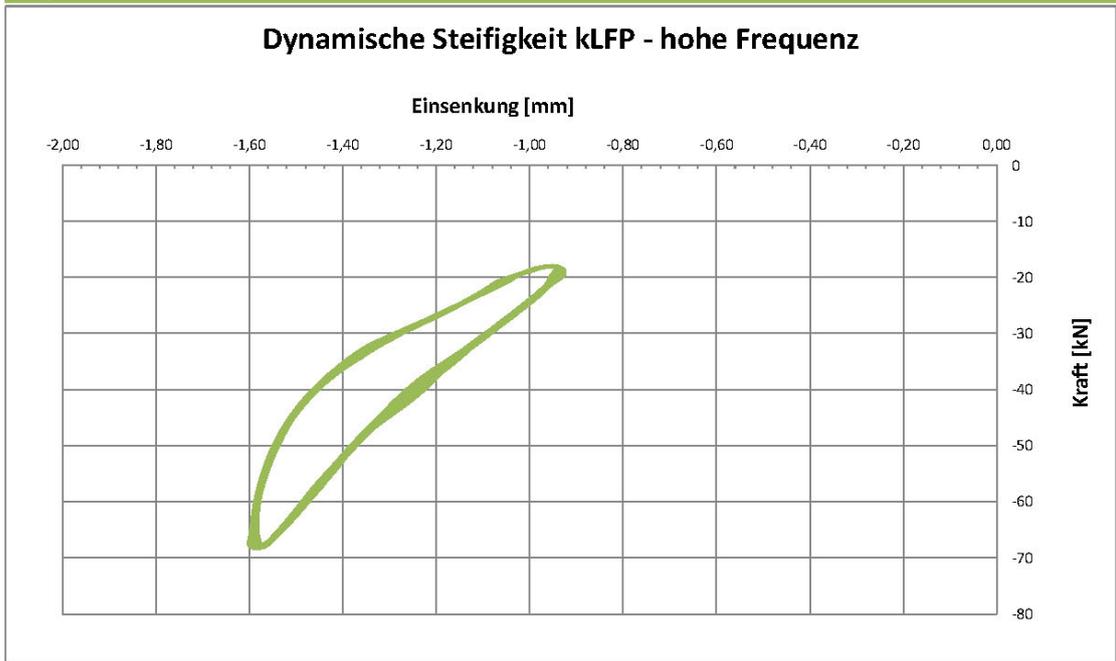
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	7
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	71,5	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,1	kN/mm
kLFP - 10 Hz	78,0	kN/mm
kLFP - 20 Hz	78,3	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	8
Messwerte / Zyklus	26

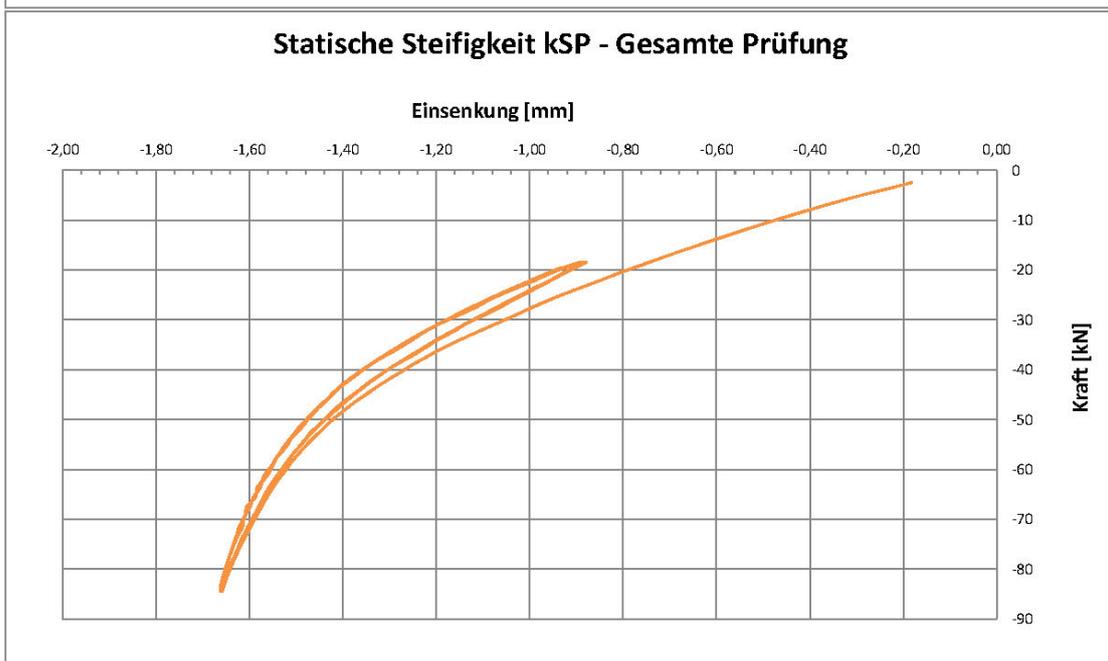
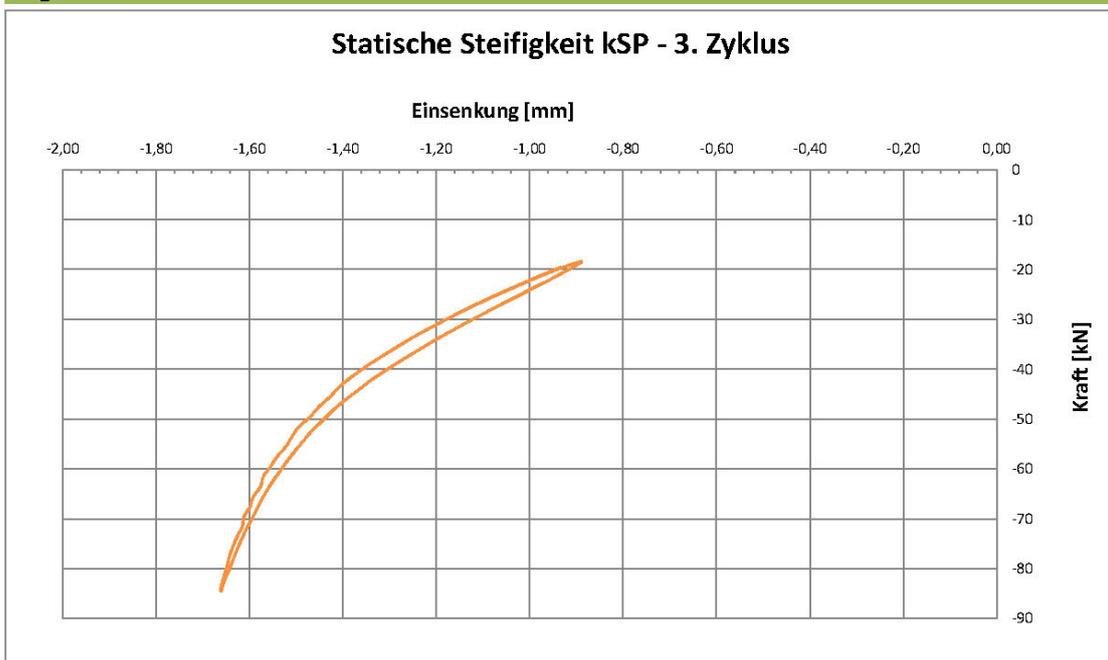
Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	71,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,3	kN/mm
kLFP - 10 Hz	77,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	77,8	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

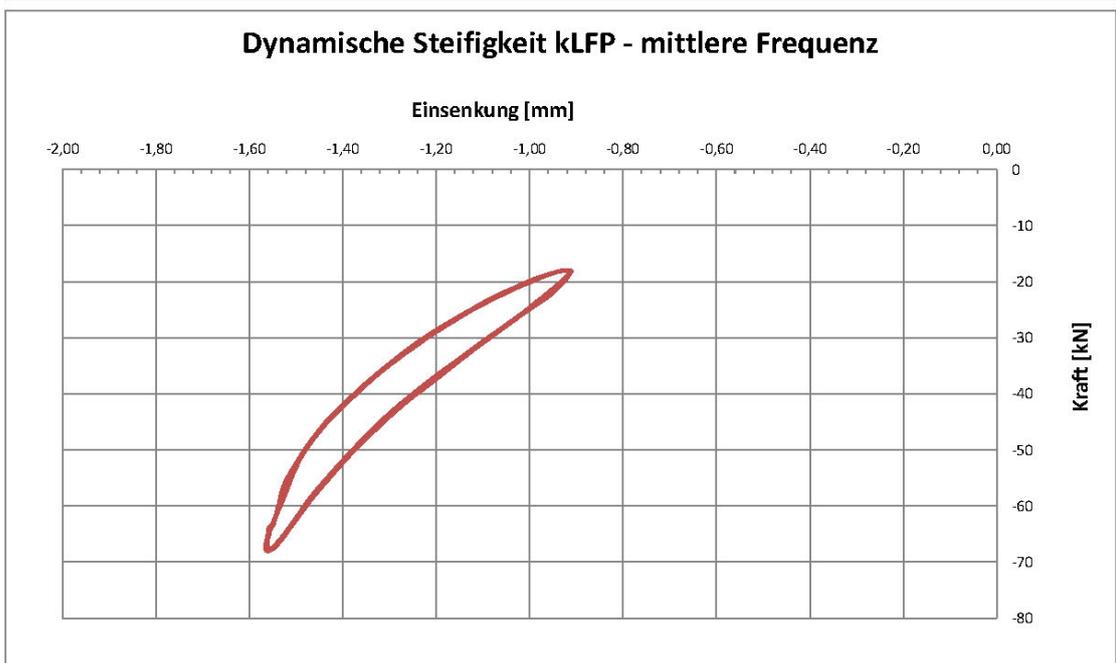
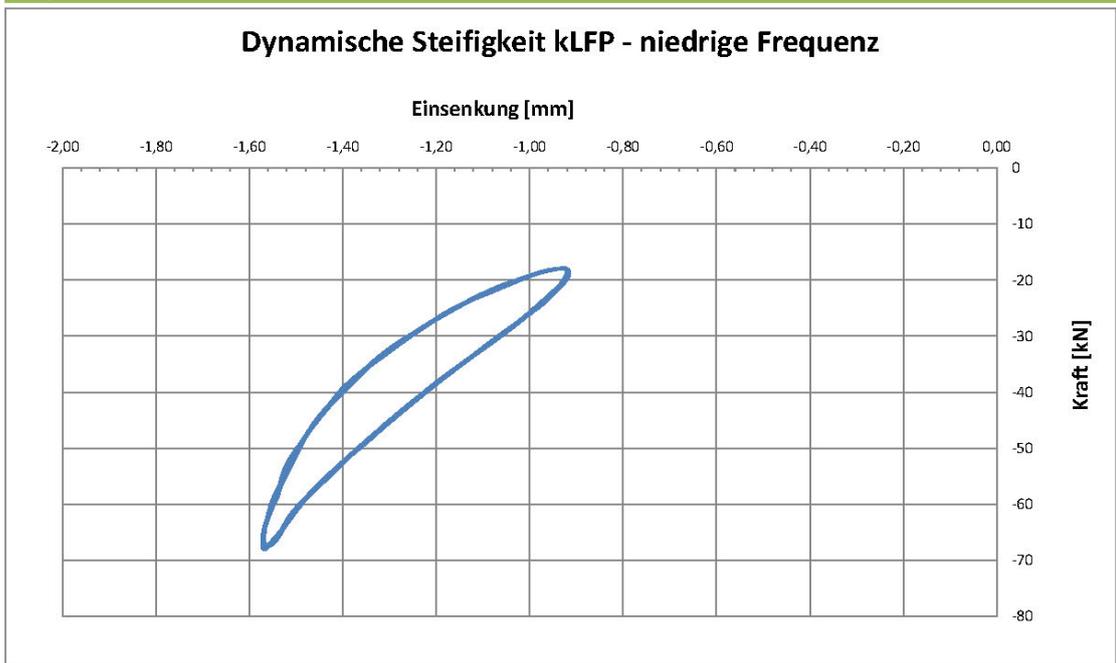
Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	8
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei		
Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	71,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,3	kN/mm
kLFP - 10 Hz	77,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	77,8	kN/mm

Diagramme



Beschreibung des Testlaufs

Maschine	MTS 322
Testlauf	
Bezeichnung	ZW900
Probennummer	8
Messwerte / Zyklus	26

Auswertung bei

Fmin	18,0	kN
Fmax	68,0	kN
Frequenzen	5	Hz
	10	Hz
	20	Hz

Ermittelte Werte

kSP	71,8	kN/mm
kLFP - 5 Hz	77,3	kN/mm
kLFP - 10 Hz	77,8	kN/mm
kLFP - 20 Hz	77,8	kN/mm

Diagramme

