



Adrian Aumayr, BSc

Transportfestigkeit von Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Moser

Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Brunnhofer

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik
Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Rene Rosenberger
SIEMENS Transformers Weiz

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei jenen Personen bedanken, die diese Arbeit ermöglicht haben. Besonderer Dank gilt dem Unternehmen SIEMENS AG, meinem Vorgesetzten Herrn Ing. Jürgen Gangel und meinem Betreuer im Unternehmen Herrn Dipl.-Ing. Rene Rosenberger. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Betreuern der Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik, Herrn Dr. Christian Moser und Herrn Dr. Peter Brunnhofer, für die Unterstützung bedanken.

Kurzfassung:

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen von Transportbelastungen auf Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel. Eingangs werden die notwendigen technischen Merkmale von Verteiltransformatoren und die Grundlagen zum Thema Transportbelastungen erläutert. Darauf aufbauend ergeben sich vier Arbeitspakete. Im ersten Schritt wird eine Schadensanalyse anhand von dokumentierten Abweichungsberichten durchgeführt. Auf Basis der Erkenntnisse dieser Analyse werden in fehleranfälligen Bereichen des Kessels mehrere Materialproben entnommen. Diese Proben werden verschiedenen zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen unterzogen, um die Ausführungsqualität der Schweißnähte zu überprüfen. Abschließend werden FEM-Berechnungen an einem ausgewählten Wellwandkessel mit drei unterschiedlichen Versteifungskonzepten durchgeführt. Dafür wird ein parametrisches 3D-Modell des Wellwandkessels und des Aktivteiles erstellt. Anhand der FEM-Berechnungen wird gezeigt, dass in den fehleranfälligen Bereichen auch die höchsten Spannungen auftreten.

Abstract:

This thesis deals with the effects of transport loads on distribution transformers with corrugated wall tanks. At the beginning the necessary technical characteristics of distribution transformers and the basics of transport loads are explained. Based on this, four work packages are developed. In the first step, a damage analysis is carried out based on documented non-conformity reports. In regard to the findings of this analysis, several material samples are taken in areas of the corrugated wall tank that are prone to faults. These samples are subjected to various non-destructive and destructive tests in order to check the quality of the weld seams. Finally, FEM calculations are carried out on a selected corrugated wall tank with three different reinforcement concepts. A parametric 3D model of the corrugated wall tank and the active part is created for this purpose. Based on the FEM calculations it is shown that the areas that are prone to faults also exhibit the highest stresses.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Ausgangssituation	5
1.2	Motivation.....	6
2	Literatur und technische Grundlagen.....	6
2.1	Beschreibung flüssigkeitsgefüllter Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel.....	6
2.2	Konstruktive Ausführung eines Wellwandkessels.....	8
2.3	Transport und Transportbelastungen	9
2.3.1	Straßentransport	11
2.3.2	Seetransport.....	12
2.3.3	Schienentransport.....	13
2.3.4	Verladevorschrift.....	15
2.4	Mechanische Anforderungen für die Auslegung.....	16
2.5	Möglichkeiten zur Transportüberwachung.....	17
2.5.1	Transportdatenlogger.....	17
2.5.2	Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)	19
3	Aufgabenstellung.....	21
4	Schadensanalyse.....	21
4.1	Schäden nach der Auslieferung.....	21
4.2	Schäden vor der Auslieferung	26
4.3	Schlussfolgerung aus der Schadensanalyse	27
5	Zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtuntersuchungen.....	28
5.1	Sichtprüfung und Farbeindringprüfung.....	30
5.2	Schliffvorbereitung.....	31
5.3	Mikroskopie.....	32
5.3.1	Ungeätzte Aufnahmen	32

5.3.2	Geätzte Aufnahmen	34
5.3.3	Härtemessungen HV10.....	34
5.4	Schlussfolgerung aus den Schweißnahtuntersuchungen.....	35
6	3D-Modellerstellung und FEM-Berechnung.....	36
6.1	Auswahl eines geeigneten Transformators.....	36
6.2	Erstellung von 3D-Modellen für die FEM-Berechnung.....	37
6.3	Versteifungsvarianten am Kessel	40
6.4	Grundlegende Annahmen für die FEM-Berechnung.....	41
6.5	Vernetzung	44
6.5.1	Aktivteil.....	44
6.5.2	Kessel.....	46
6.5.3	Submodelle.....	47
6.6	Lastannahmen und Reaktionskräfte	48
6.6.1	Lastannahmen am Kessel	48
6.6.2	Reaktionskräfte auf den Kesseldeckel.....	50
6.7	Lastsetup in ANSYS.....	51
6.7.1	Aktivteil.....	51
6.7.2	Kessel.....	52
6.7.3	Submodelle.....	53
6.8	Ergebnisse	54
6.8.1	Aktivteil.....	54
6.8.2	Kessel.....	57
6.8.3	Ermüdungsfestigkeit.....	65
7	Technische Auswirkungen und Lösungsvorschläge.....	67
8	Zusammenfassung.....	69
9	Abbildungsverzeichnis	73

10	Tabellenverzeichnis	76
11	Literaturverzeichnis	77
12	Anhang.....	78
12.1	Zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtuntersuchungen	78
12.2	Lastsetups.....	82
12.3	FEM-Ergebnisse	84
12.4	Werkstoffdaten aus Zugversuchen	89

1 Einleitung

Diese Masterarbeit wurde in Zusammenarbeit mit SIEMENS Transformers Weiz, Verteiltransformatorenbau (STW DT) durchgeführt. Am Standort werden hauptsächlich Verteiltransformatoren für die Bereiche erneuerbare Energien und Industrie gefertigt. Die Transformatoren werden deshalb sowohl für die Einspeisung von Energie in das Netz als auch zur Bereitstellung von Energie für Verbraucher eingesetzt. Bis vor ca. zehn Jahren wurden bei STW DT ausschließlich kleine Verteiltransformatoren bis zu einer Leistung von ungefähr 2,5 MVA gebaut. Bei Transformatoren mit höheren Leistungen spricht man schon von kleinen Leistungstransformatoren. Das Portfolio von STW DT hat sich allerdings in den letzten zehn Jahren grundlegend geändert. Die Leistungsgrenzen und die technische Komplexität haben sich dabei deutlich erhöht. Das heutige Portfolio umfasst:

- Transformatoren in ein- und dreiphasiger Ausführung
- Nennscheinleistung: ca. 20 MVA
- Maximale Spannung: 72,5 kV
- Anwendungsgebiete:
 - Transformatoren für Windkraftanlagen
 - Transformatoren für Photovoltaikanlagen
 - Umrichtertransformatoren
 - Industrietransformatoren [1]
 - Etc.

1.1 Ausgangssituation

Es gibt bei den Verteiltransformatoren zwei vom Konzept her unterschiedliche Kesselausführungen. Zum einen gibt es die Ausführung als Wellwandkessel. Diese deckt den unteren bis mittleren Leistungsbereich ab. Für Transformatoren mit großen Leistungen wird ein Glattwandkessel mit Radiatoren verwendet. Diese Masterarbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Transportfestigkeit von Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel. Der Wellwandkessel wurde ursprünglich für Verteiltransformatoren mit Leistungen kleiner 4 MVA entwickelt [2]. Bei höheren Leistungen werden die Transformatoren in der Regel mit Radiatorkessel ausgeführt. Der Vorteil eines Radiatorkessels gegenüber einem Wellwandkessel ist die höhere mechanische Stabilität. Für kleine Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel stellt das aufgrund der geringen Massen kein Problem dar. Mit steigender Leistung erhöhen sich allerdings auch die Massen der Transformatoren. Am Standort Weiz werden derzeit Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel bis zu einer Leistung von ca. 8 MVA produziert. Ein derartiger

Transformator hat in etwa eine Gesamtmasse von 18.000 kg. Im Vergleich dazu hat ein typischer Verteiltransformator mit 2 MVA Leistung eine Gesamtmasse von 5.200 kg [1]. Wird der Transformator Beschleunigungen ausgesetzt, das ist zum Beispiel beim Transport der Fall, treten mit steigender Masse größere Belastungen auf. Werden diese Kräfte zu groß, können dadurch Schäden an den Strukturbauteilen des Transformators entstehen. Die Transformatoren von STW DT werden weltweit eingesetzt und sind somit auf internationale Transportketten angewiesen. Das bedeutet, dass die Transformatoren mehrmals umgeladen und mit verschiedenen Transportmitteln befördert werden. Aufgrund unterschiedlicher Einflussfaktoren treten innerhalb dieser Transportketten verschiedenste Transportbelastungen auf.

Sämtliche Kessel werden von Sublieferanten produziert. Einzig bei geschweißten Deckelausführungen werden die Schweißarbeiten im Werk von STW DT durchgeführt.

1.2 Motivation

In der Vergangenheit sind an einigen Wellwandkesseln nach der Auslieferung Schäden aufgetreten. Bei vielen war die Ursache nicht eindeutig zu bestimmen. Es wird allerdings vermutet, dass die Schäden durch Belastungen während des Transportes entstanden sind. Diese aufgetretenen Schäden sind die Motivation für diese Masterarbeit. Im Rahmen der Masterarbeit soll beleuchtet werden, welchen Einfluss der Transport auf Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel hat.

2 Literatur und technische Grundlagen

2.1 Beschreibung flüssigkeitsgefüllter Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel

Ein typischer Verteiltransformator besteht aus einem, mit Isolierflüssigkeit gefüllten, Kessel. Darin eingesetzt ist der sogenannte Aktivteil. Dieser setzt sich wiederum aus dem Eisenkern und üblicherweise ein bis drei Wicklungen zusammen. Der Kern besteht aus geschichteten Transformatorkernblechen. Der gesamte Aktivteil ist über sogenannte Jochzugbolzen mit dem Deckel verbunden. Im eingebauten Zustand steht der Aktivteil am Boden des Kessels. Für gewöhnlich sind die Hochvolt- und Niedervoltdurchführungen am Deckel angeordnet. Die Durchführungen stellen die Verbindung zwischen den Wicklungen und dem Netz her. In Abbildung 1 ist ein aufgeschnittener Verteiltransformator mit Wellwandkessel dargestellt.

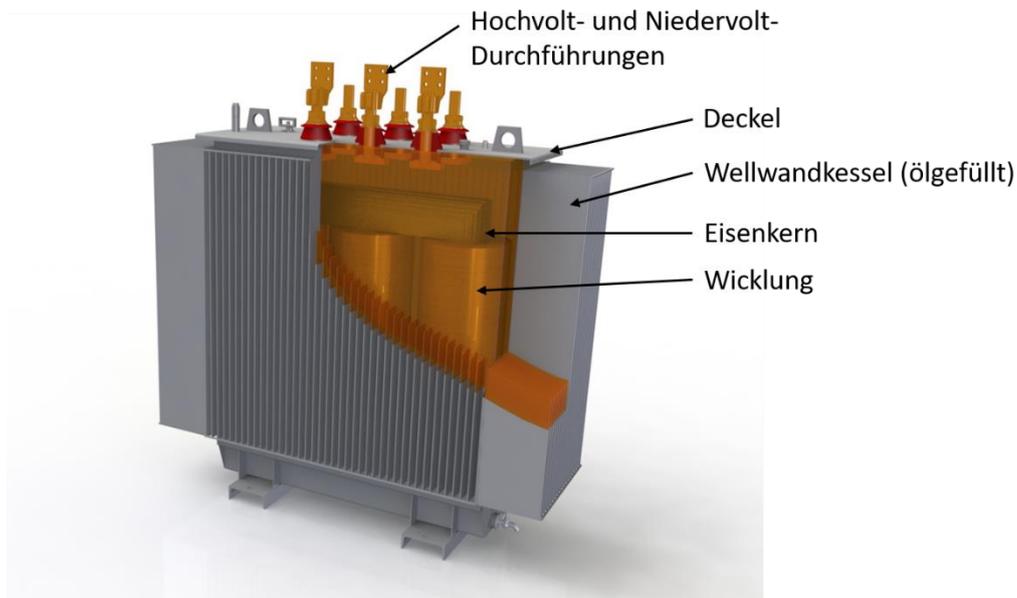


Abbildung 1: Vereinfachte Schnittansicht eines Wellwandtransformators [1]

Der große Vorteil des Wellwandkessels gegenüber einem Radiatorkessel ist, dass in den meisten Fällen kein Dehngefäß verwendet werden muss. Das Dehngefäß dient dazu die Ausdehnung der Isolierflüssigkeit bei Temperaturänderungen auszugleichen. Beim Wellwandkessel übernehmen die Wellwände die Kühlung und die Kompensation der Wärmeausdehnung der Isolierflüssigkeit. Bei derartigen Transformatoren spricht man von einer hermetischen Ausführung. Die Verwendung eines Dehngefäßes hat mehrere Nachteile. Zum einen verursacht es zusätzliche Kosten und zum anderen muss ein Luftentfeuchter verbaut werden. Wird kein Luftentfeuchter verbaut, nimmt die Isolierflüssigkeit Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Das hat eine verminderte Isolierfähigkeit zur Folge und führt zu einer vorzeitigen Alterung der Isolierflüssigkeit. Aufgrund des geringeren Wartungsaufwandes und der geringeren Komplexität des Systems sind Wellwandtransformatoren in der Regel kostengünstiger als Transformatoren mit Radiatorkessel. Die Materialstärke der Wellwände ist nach oben hin allerdings mit ca. 1,5 mm begrenzt und stellt somit einen limitierenden Faktor dar. Derzeit wird daran gearbeitet, die Stärke der Wellwandbleche auf 2 mm zu erhöhen. Das ist allerdings mit Investitionen an den bestehenden Fertigungsanlagen verbunden. Die Herstellung der Wellwände erfolgt auf speziell dafür gebauten Maschinen. Die Materialzufuhr für die Maschinen erfolgt über Blech-Coils. Daraus werden vollautomatisch die Wellwände gefaltet, geprägt und dichtgeschweißt. In Abbildung 2 ist ein Transformator mit Radiatorkessel dargestellt. Die Radiatoren werden an den aus ebenen Blechen gefertigten Kessel angeflanscht. Diese Art von Kessel unterliegt hinsichtlich der Materialstärke keinen Begrenzungen und ist deshalb aus mechanischer Sicht deutlich stabiler [1], [2].



Abbildung 2: Radiatorkessel [1]

Im Normalfall sollten die Betriebsdrücke einen Wert von 0,1 bar bei maximal zulässiger Isolierflüssigkeitstemperatur nicht überschreiten. Bei Hermetik-Kesseln können sich ab Drücken von 0,2 bar bereits bleibende Verformungen einstellen. Drücke ab 0,6 bar bis 0,7 bar können Risse verursachen [2]. Werte von 0,2 bar können bereits durch den hydrostatischen Druck erreicht werden. Bei hermetischen Ausführungen überlagern sich der hydrostatische Druck und der, aus der temperaturbedingten Ausdehnung der Isolierflüssigkeit resultierende, Betriebsdruck.

2.2 Konstruktive Ausführung eines Wellwandkessels

Ein Wellwandkessel besteht aus den folgenden fünf Hauptkomponenten:

- Bodenwanne mit Fahrgestellträger
- Zwei Längswellwände
- Zwei Querwellwände
- Oberer Rahmen
- Deckel

Zusätzlich werden diverse Versteifungen hinzugefügt, damit die Konstruktion den Anforderungen durch den hydrostatischen Druck im Inneren genügt. In Abbildung 3 wird eine Explosionsdarstellung der Hauptkomponenten des Wellwandkessels gezeigt.

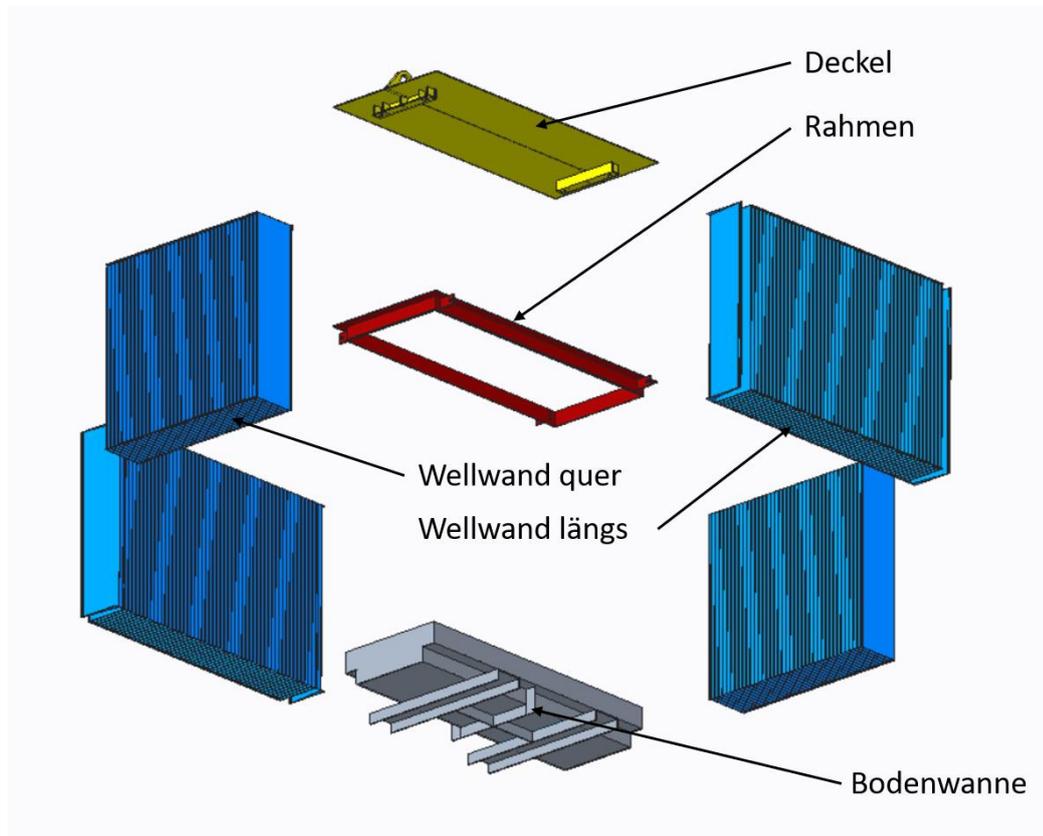


Abbildung 3: Explosionsdarstellung der Hauptkomponenten eines Wellwandkessels

Die Wellwände, die Bodenwanne und der Rahmen werden dicht miteinander verschweißt. Der Aktivteil wird an der Unterseite des Deckels mit Hilfe von vier Jochzugbolzen befestigt und anschließend über den Deckel in den Kessel gehoben. Der Deckel wird für gewöhnlich über eine Dichtung mit dem restlichen Kessel verschraubt. Es gibt allerdings auch geschweißte Ausführungen. Wobei geschweißte Ausführungen, im Hinblick auf Wartungs- oder Reparaturarbeiten, ungünstig sind.

2.3 Transport und Transportbelastungen

Transportbelastungen sind eine grundlegende Größe der Warendistribution. Sie beeinflussen die folgenden Punkte:

- Möglichkeit der Beschädigung von Transportgütern.
- Maß des Aufwandes zum Warenschutz, beispielsweise die mechanische Auslegung von Transformatoren.
- Den Vergleich der verschiedenen Transportmittel [3].

Die Kenntnis der Transportbelastungen ist grundlegend für die wirtschaftliche Gestaltung des Transportes von empfindlichen Gütern. Es gibt verschiedene Formen von Transportbelastungen. In der Praxis werden zwei große Gruppen unterschieden:

- Mechanisch-dynamische Transportbelastungen.
- Klimatische und sonstige Transportbelastungen [3].

Für Verteiltransformatoren sind in der Regel nur die mechanisch-dynamischen Transportbelastungen von Bedeutung. Die einzigen Ausnahmen stellen der Umgebungsdruck bei hermetisch geschlossenen Verteiltransformatoren mit Stickstoffpolster und die Umgebungstemperatur bei Unterschreitung von -25°C dar. Da es sich dabei aber um Spezialfälle handelt, wird in weiterer Folge nicht darauf eingegangen. In Abbildung 4 sind die möglichen Arten von mechanischen Transportbelastungen dargestellt.

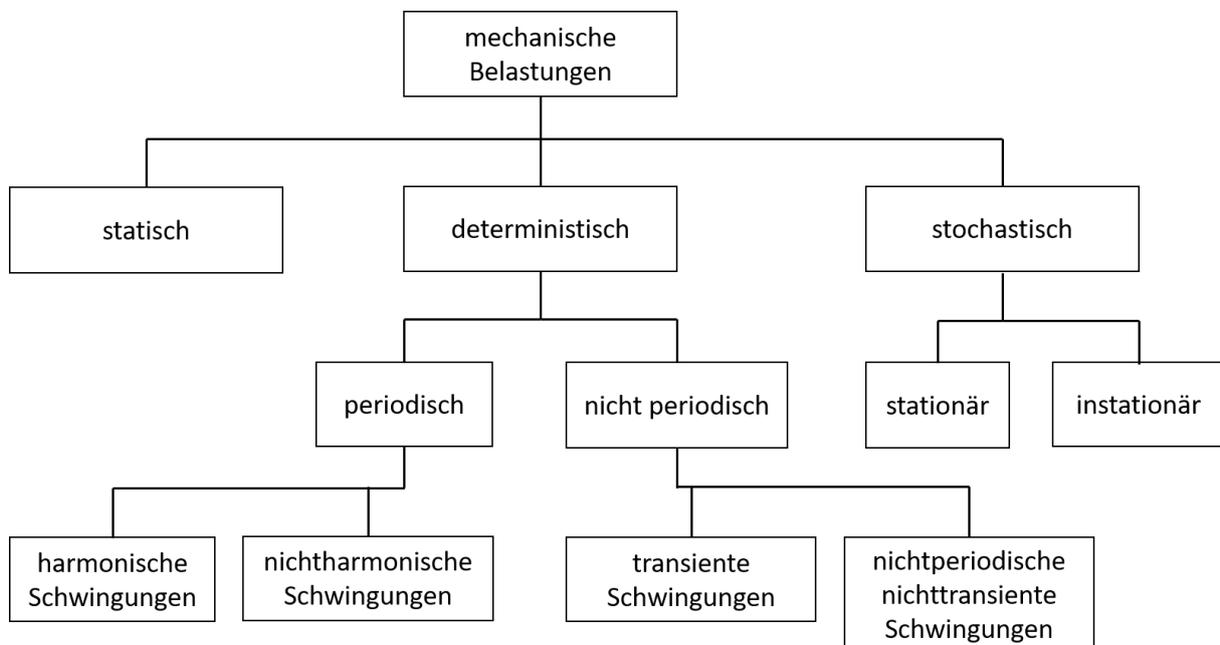


Abbildung 4: Mechanische Belastungen während des Transports [3]

Deterministische Belastungen können im Gegensatz zu stochastischen durch funktionale Abhängigkeit zwischen Zeit und der veränderlichen Größe (z.B. Beschleunigung) beschrieben werden. Deshalb werden stochastische Belastungen auch als regellose oder Zufallsbelastungen bezeichnet. Für gewöhnlich handelt es sich bei Transportbelastungen immer um stochastische Vorgänge. Im Einzelfall enthalten diese auch deterministische Anteile. Meist werden bei diesen stochastischen Funktionen nur die relevanten Anteile, wie zum Beispiel Stöße, erfasst und ausgewertet. Vibrationen spielen bei den Betrachtungen meist eine eher untergeordnete Rolle. Allerdings können diese, im Zusammenhang mit den Eigenfrequenzen der Transportgüter, zu Problemen führen. Um Probleme mit Vibrationen zu vermeiden sollten die Eigenfrequenzen der Transportgüter bekannt sein [3], [4], [5].

Verteiltransformatoren werden je nach Bestimmungsort mit verschiedenen Transportmitteln transportiert. Die wichtigsten sind LKW und Schiff. Es ist aber auch ein Transport mittels Bahn oder Flugzeug denkbar. Die genannten Transportmittel verursachen jeweils unterschiedliche mechanische Belastungen. Eine weitere wichtige Rolle spielt das Handling in der Fabrik, zwischen den Transportmitteln und am Bestimmungsort. Bei den angeführten Transportmitteln können Stöße und Vibrationen in allen drei Raum-Achsen auftreten [6]. Folgende Schäden durch Transportbelastungen sind bekannt:

- Bleibende Verformungen am Kessel, die zu Leckagen führen.
- Eine Verschiebung oder Verformung der Wicklungen und/oder des Kerns.
- Durch Bewegungen des Aktivteiles kann es zu Beschädigungen an den Isolierungen kommen, was in weiterer Folge Kurzschlüsse verursachen kann.
- Die Klemmkräfte am Kern können durch Vibrationen beeinträchtigt werden. Das führt im schlimmsten Fall, aufgrund der starken magnetischen Kräfte, zu einer Zerstörung des Aktivteiles bei Kurzschlüssen.
- Der Sicherheitsabstand zwischen Kessel und Aktivteil könnte durch Verformungen am Aktivteil unterschritten werden. Das führt zu elektrischen Überschlägen im Betrieb.

Im Folgenden werden die einzelnen Transportmittel und deren, bei üblichem Einsatz zu erwartende, Transportbelastungen aufgezeigt.

2.3.1 Straßentransport

Die Belastungen beim Straßentransport mit einem LKW sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Beispiele dafür sind:

- Die Fahrweise des Fahrers (Bremsen, Spurwechsel, etc.)
- Der Fahrzeugtyp (Sattelzug, Motorwagen, Tiefbettanhänger, Federung etc.) und der Zustand des Fahrzeuges
- Die Fahrbahnbeschaffenheit

Tabelle 1 zeigt typische Beschleunigungswerte für den Straßentransport. Zu beachten ist, dass es sich dabei um Werte für sorgfältig durchgeführte Transporte handelt. Bei unachtsamer Fahrweise und schlechten Fahrbahnverhältnissen können diese Werte abweichen [7].

Tabelle 1: Beschleunigungswerte für den Straßentransport in g [7].

Beförderung auf der Straße				
Sicherung in	Beschleunigungskoeffizienten			
	Längs (c_x)		Quer (c_y)	Minimum nach unten (c_z)
	voraus	zurück		
Längsrichtung	0,8	0,5	-	1,0
Querrichtung	-	-	0,5	1,0

2.3.2 Seetransport

Werden Verteiltransformatoren auf einem Schiff transportiert, sind diese für gewöhnlich, seetauglich verpackt, in Containern verstaut. Die Belastungen, die beim Seetransport auftreten, sind stark abhängig von den Wetterbedingungen. Des Weiteren hängen die Belastungen von den Abmessungen und Eigenschaften des Schiffes ab. Die Belastungen in Tabelle 2 erscheinen auf den ersten Blick nicht besonders hoch. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass bei einer mehrtägigen Schlechtwetterphase sehr viele Lastwechsel auftreten. Bei einer angenommen Rollrate von 10 Sekunden ergeben sich 8640 Lastwechsel pro Tag [5].

Tabelle 2: Beschleunigungswerte für den Seetransport in g [7].

Beförderung auf See					
Kennzeichnende Wellenhöhe im Seegebiet		Sicherung in	Beschleunigungskoeffizienten		
			Längs (c_x)	Quer (c_y)	Minimum nach unten (c_z)
A	$H_s \leq 8 \text{ m}$	Längsrichtung	0,3	-	0,5
		Querrichtung	-	0,5	1,0
B	$8 \text{ m} < H_s \leq 12 \text{ m}$	Längsrichtung	0,3	-	0,3
		Querrichtung	-	0,7	1,0
C	$H_s > 12 \text{ m}$	Längsrichtung	0,4	-	0,2
		Querrichtung	-	0,8	1,0

Die Werte für die Beschleunigungen an Bord eines Schiffes sind zudem stark abhängig vom Ort, an dem das Transportgut an Bord verstaut ist. In Abbildung 5 sind die ortsabhängigen Lasten, die an Bord eines Schiffes auftreten können, dargestellt. In der Regel muss man allerdings von den ungünstigsten Voraussetzungen ausgehen, da auf den Stauplatz nur bedingt Einfluss genommen werden kann. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Verladepositionen am Schiff können 0,8 g in horizontaler Richtung und 1 g in vertikaler Richtung angenommen werden [5].

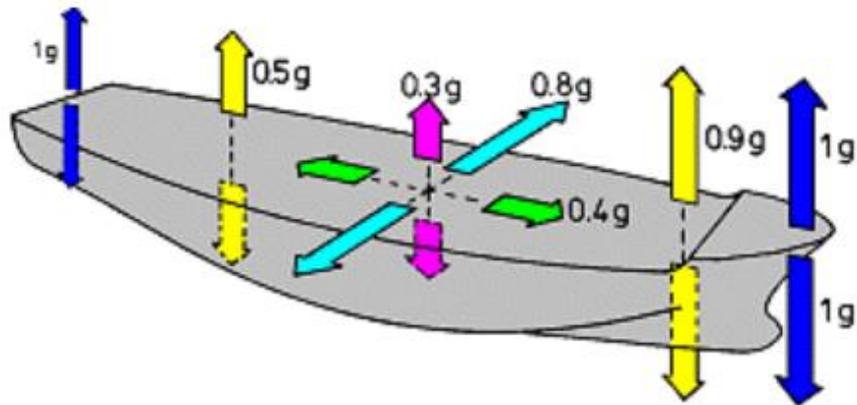


Abbildung 5: Transportlasten an Bord eines Schiffes abhängig von der Verladeposition [5]

2.3.3 Schienentransport

Vorweg ist anzumerken, dass der Schienentransport eher für große Leistungstransformatoren als für Verteiltransformatoren in Frage kommt. Allerdings ist es dennoch denkbar für große Verteiltransformatoren oder aufgrund von geographischen Gegebenheiten auf den Schienentransport zurückzugreifen.

Während des Schienentransportes können viele verschiedene Arten von Transportbelastungen auftreten. Diese Belastungen können, abhängig von verschiedenen Faktoren, stark variieren. Deshalb ist es notwendig, dass der Transport per Bahn mit besonderer Sorgfalt geplant wird. Durch die folgenden Faktoren gibt es große Unterschiede bei den möglichen Transportbelastungen, die durch den Schienentransport verursacht werden:

- Art des verwendeten Waggons
- Art der verwendeten Kupplungen und Puffer
- Sicherungsmethode des Transformators auf dem Waggon
- Änderungen des Schienenbettes und der Streckengeometrie
- Unterschiedliche Bremssysteme
- Zugkonfiguration: Position des Transformators
- Nationale Unterschiede [8]

Die Werte in den verfügbaren Normen weichen dementsprechend stark voneinander ab. So gibt zum Beispiel der CTU-Code [7] die in Tabelle 3 dargestellten Werte für zu erwartende Transportbelastungen an. Von der International Union of Railways (UIC) werden hingegen die in Tabelle 4 angeführte Werte angegeben. Auffällig bei den Angaben der UIC ist vor allem die hohe Beschleunigung in Längsrichtung.

Tabelle 3: Transportbelastungen für Schienentransport gemäß CTU-Code in g [7].

Beförderung auf der Schiene (Kombinierter Verkehr)				
Sicherung in	Beschleunigungskoeffizienten			
	Längs (c_x)		Quer (c_y)	Minimum nach unten (c_z)
	voraus	zurück		
Längsrichtung	0,5 (1,0) [†]	0,5 (1,0) [†]	-	1,0 (0,7) [†]
Querrichtung	-	-	0,5	1,0 (0,7) [†]

[†] Die Werte in Klammern gelten für Stoßbelastungen mit nur kurzen Stößen von 150 Millisekunden oder kürzer und können beispielsweise für die Auslegung von Verpackungen benutzt werden.

Tabelle 4: Transportbelastungen im Schienenverkehr gemäß UIC in g [9].

Zug-Typ	Längs	Quer	Vertikal
Standardzug	4,0 g (für 100 ms)	0,5 g (Vibration 2-8 Hz)	0,3 g (Vibration 2-8 Hz) + Erdbeschleunigung
Waggons mit Hochleistungsdämpfern; kein Rangieren	1,0 g (für 100 ms)	0,5 g (Vibration 2-8 Hz)	0,3 g (Vibration 2-8 Hz) + Erdbeschleunigung

In DIN EN 12663 sind die Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen festgelegt. Gemäß dieser Norm müssen die Güterwagen den in der Norm angeführten Beschleunigungen standhalten können. Man kann nun davon ausgehen, dass das geladene Transportgut den gleichen Beschleunigungen ausgesetzt wird. Allerdings ist dieser Fall äußerst unwahrscheinlich und tritt nur bei unsachgemäßer Ausführung des Bahntransportes auf. Für diesen Fall werden die Lastfälle in Tabelle 5 berücksichtigt. Hinzukommt bei diesen Werten die Erdbeschleunigung. Bei sachgemäßer Durchführung des Bahntransportes ist allerdings davon auszugehen, dass die maximalen mechanischen Belastungsamplituden den Werten in Tabelle 3 und Tabelle 4 entsprechen. Die Transformatoren können zusätzlich beim Transporteur als empfindliches Transportgut deklariert werden.

Tabelle 5: Lastfälle gemäß DIN EN 12663-2 [10].

Lastfall	Längs	Quer	Vertikal
SLC 1	+/- 5 g		
SLC 2		+/- 1 g	
SLC 3			+/- 2 g (am Fahrzeugende)

2.3.4 Verladevorschrift

In diesem Kapitel wird die Transportkonfiguration der Wellwandtransformatoren beschrieben. Vorweg sei angemerkt, dass es je nach Größe beziehungsweise Masse der Transformatoren verschiedene Verladevorschriften gibt. In diesem Kapitel wird ausschließlich die Verladevorschrift für Transformatoren mit einer Masse > 4.000 kg behandelt.

In Abbildung 6 ist die derzeitige Verladevorschrift für Wellwandtransformatoren dargestellt. Die jeweiligen Lastaufnahme­punkte am Transformator sind in den Bildern gut zu erkennen. Die Zurrmittel (ZM) gegen Verrutschen haben eine Tragfähigkeit von mindestens 2000 daN für eine Masse unterhalb von 10.000 kg und 5000 daN, wenn 10.000 kg überschritten werden. Als Zurrmittel gegen Kippen werden Spanngurte mit einer Tragfähigkeit von mindestens 2.000 daN verwendet. Der dynamische Reibwert der Antirutschmatten beträgt mindestens $\mu = 0,6$. Der Zurrwinkel beträgt $\beta = 5^\circ \dots 50^\circ$. Sämtliche Zurrmittel dürfen nur handfest gespannt werden.

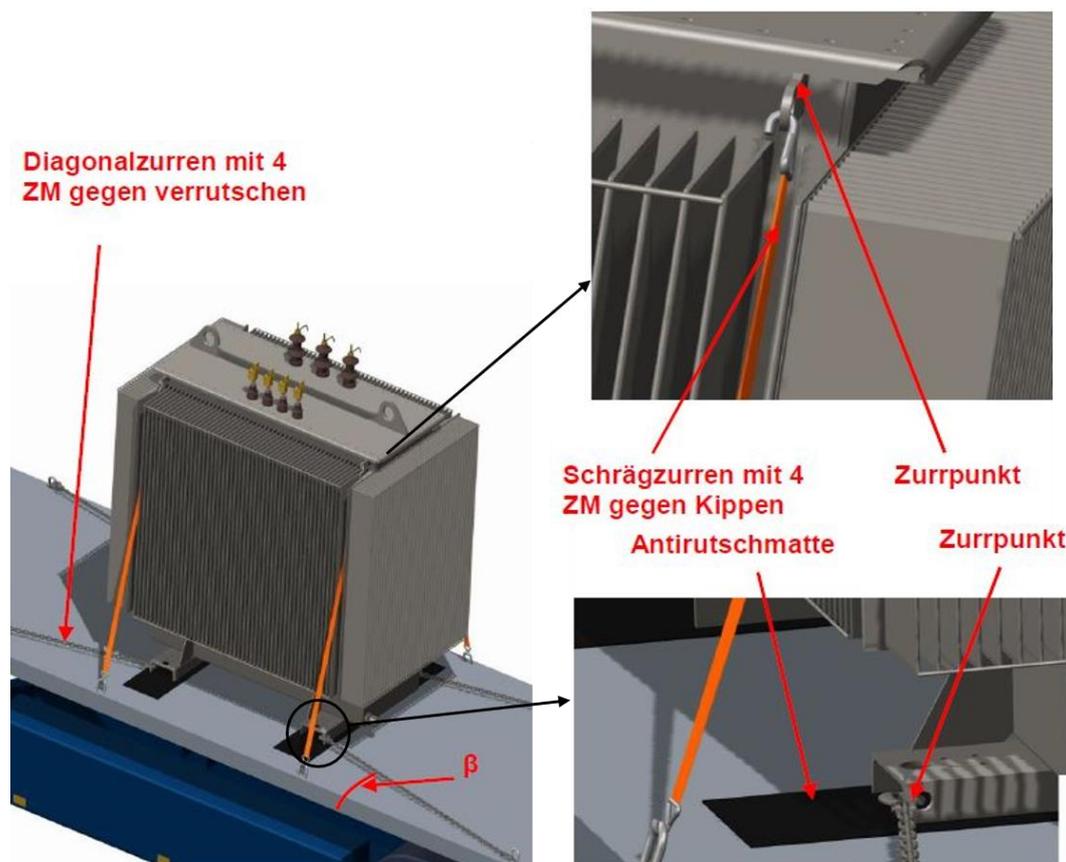


Abbildung 6: Transportkonzept für Transformatoren mit einer Masse > 4000 kg [1]

2.4 Mechanische Anforderungen für die Auslegung

Ein Transformator sollte derart ausgelegt werden, dass er die während dem Transport zu erwartenden Belastungen ohne Schäden übersteht. Dabei hat sich vor allem im Großtransformatorenbau folgende Vorgehensweise bewährt:

- Design Limits basieren auf statischen Berechnungen.
- 1 g statisch als generelle Untergrenze für die Auslegung. Außer bei Schienentransport wo 2 g oder höher gefordert sein können.
- Das Design sollte bei verschiedenen Transportarten immer für den Worst-Case ausgelegt werden.
- Der Aktivteil muss ausreichend fixiert sein, um eine Bewegung im Inneren des Tanks zu verhindern.
- Ein Verrutschen der einzelnen Kernbleche muss verhindert werden.
- Die Verzurr-, Hebe- und Verschiebepunkte müssen die Anforderungen der verwendeten Transportmittel erfüllen.
- Die Anbauten müssen beim Transport ebenfalls berücksichtigt werden [8].

Genauere Design Limits können aus Messungen von dynamischen Schocks während des Transportes abgeleitet werden. Allerdings setzt das eine ausreichende Erfahrung und Datenlage voraus. Das größte Problem ist, dass die statischen Berechnungen nicht den tatsächlich auftretenden dynamischen Belastungen entsprechen. Allerdings sind die statischen Berechnungen deutlich einfacher durchzuführen als dynamische. Bei dynamischen Belastungen müssen viele Faktoren, wie zum Beispiel Trägheit oder Dämpfung berücksichtigt werden. Aufgrund des hohen Aufwandes wurden derartige Berechnungen bisher nicht durchgeführt [8].

Es können sogenannte Transportdatenlogger verwendet werden, um die während des Transportes auftretenden Stöße aufzuzeichnen. Allerdings setzen sich die gemessenen Werte aus Beschleunigungsamplitude, Dauer und Geschwindigkeitsänderung zusammen. Bei der statischen Berechnung werden hingegen nur Beschleunigungen verwendet. Somit kann hier kein direkter Zusammenhang hergestellt werden [8].

Gemäß IEC 60076-1 müssen Transformatoren so ausgelegt sein, dass diese in der Lage sind eine Beschleunigung von mindestens 1g statisch in allen Raum-Achsen unbeschadet zu überstehen. In vertikaler Richtung bedeutet das in Summe 2g, da die Erdbeschleunigung hinzugerechnet werden muss.

Sollten vom Kunden höhere Werte gefordert werden, ist der Hersteller verpflichtet diese durch entsprechende Berechnungen zu belegen. Wenn beim Transport höhere Werte zu erwarten sind und die Verantwortung für den Transport beim Kunden liegt, dann müssen diese Werte mit den zugehörigen Frequenzen vom Kunden in der Anfrage angeführt werden [11].

2.5 Möglichkeiten zur Transportüberwachung

Für die Transportüberwachung von Transformatoren kommen hauptsächlich zwei Methoden in Frage. Die erste Möglichkeit sind Transportdatenlogger zum Aufzeichnen von Stoßereignissen. Bei großen Leistungstransformatoren kommen diese in der Regel standardmäßig zum Einsatz. Bei Verteiltransformatoren werden Transportdatenlogger derzeit nur vereinzelt eingesetzt. Eine Möglichkeit zur Detektion von Beschädigungen am Aktivteil ist die sogenannte Sweep Frequency Response Analysis (SFRA). Mithilfe dieser Methoden ist es möglich Rückschlüsse auf eventuelle Beschädigungen durch den Transport zu ziehen [12].

2.5.1 Transportdatenlogger

Es gibt zwei, hinsichtlich ihrer Aufzeichnungsart, verschiedene Arten von Transportdatenloggern. Digitale Ausführungen und mechanische Ausführungen die auf Papier schreiben. Wobei Letztere nur noch sehr selten eingesetzt werden. Die Vorteile der digitalen Geräte bezüglich ihres Platzbedarfes, der Robustheit und der Laufzeit liegen auf der Hand. Des Weiteren ist es mit den digitalen Geräten zusätzlich möglich, GPS Daten der Ereignisse zu erfassen und wenn gewünscht per Mobilfunk in Echtzeit zu übertragen [12].

Die Aufgabe von Transportdatenloggern ist es, ungewöhnliche Stoßereignisse zu registrieren und aufzuzeichnen. Das heißt, der Transportdatenlogger zeichnet erst auf, wenn voreingestellte Grenzwerte überschritten werden. Die Beschleunigungswerte werden dabei in drei rechtwinkelig zueinanderstehenden Raumachsen erfasst. Zusätzlich werden die Stoßdauer und die Differenzgeschwindigkeit des Stoßes berechnet. Die Stoßdauer entspricht der Zeit, während der die Beschleunigung größer 10 % des voreingestellten Grenzwertes ist. In Abbildung 7 ist exemplarisch ein Stoßereignis dargestellt. Die y-Achse entspricht der Beschleunigung und die x-Achse der Zeit. Die Zeitspanne „2“ entspricht der erfassten Stoßdauer [13].

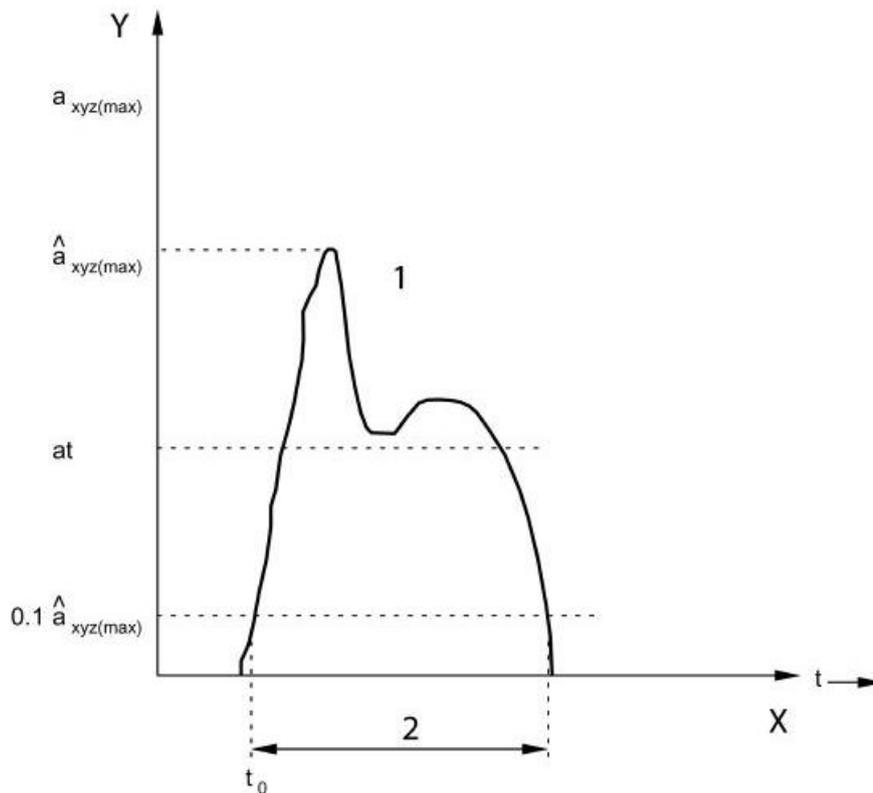


Abbildung 7: Stoßereignis [13]

Die Differenzgeschwindigkeit, oder auch Stoßstärke entspricht dem Zeitintegral der Beschleunigungsfunktion [13]:

$$\Delta v = \int_{t_0}^{t_0 + T_{Sto\beta}} a_{xyz(max)} \cdot dt \quad (1)$$

Mithilfe der Differenzgeschwindigkeit kann der Energiegehalt des Stoßereignisses abgeschätzt werden:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot \Delta v^2}{2} \quad (2)$$

In Abbildung 8 ist ein, von einem Transportdatenlogger aufgezeichnetes, Stoßereignis dargestellt. Das Kurvendiagramm zeigt den Beschleunigungsverlauf über der Zeit. Die Beschleunigungen werden dabei in drei Raumachsen aufgeteilt. Des Weiteren wird das Stoßereignis mit einem Datums- und Zeitstempel versehen.

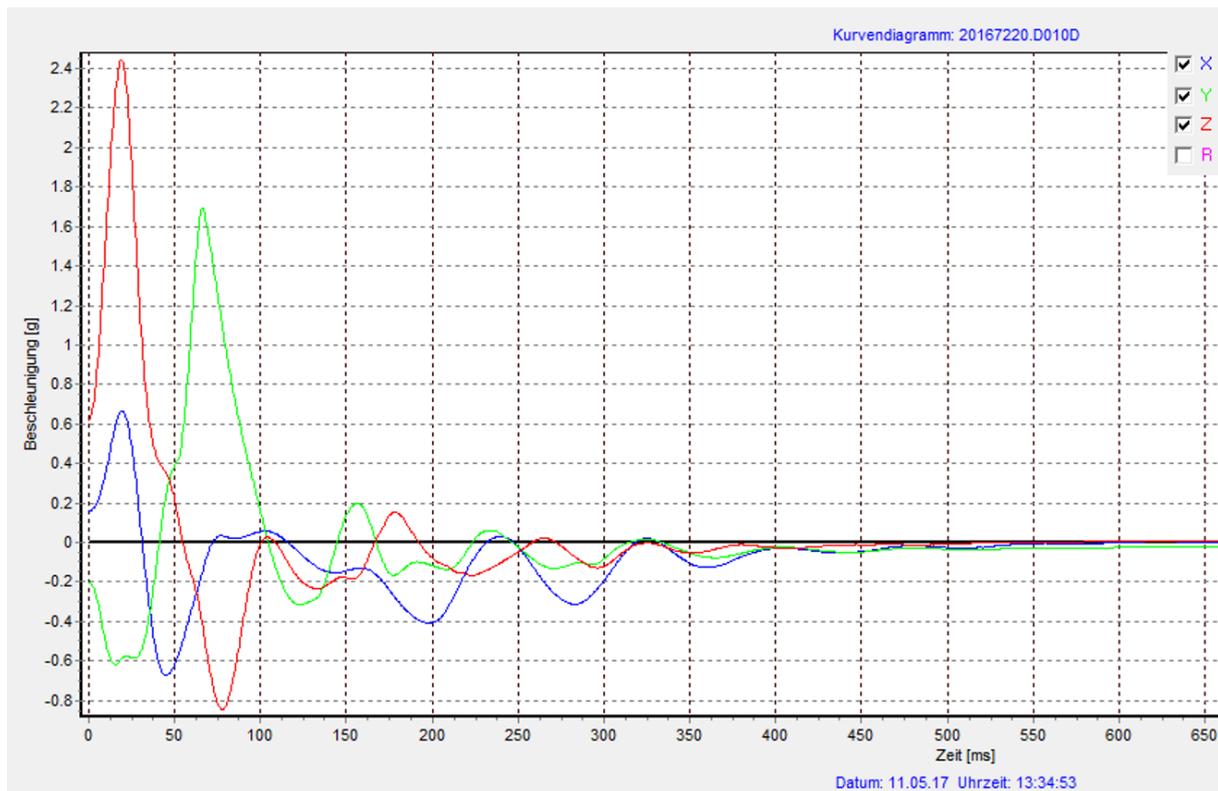


Abbildung 8: Kurvendiagramm eines Stoßereignisses

Der Transportdatenlogger muss so nahe wie möglich am Schwerpunkt des Transformators platziert werden. Die Befestigungsstelle sollte möglichst steif sein, da sonst Schwingungen der Bauteile die Messung verfälschen [12].

2.5.2 Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)

Die SFRA ist ein äußerst sensibles Diagnosewerkzeug, um Änderungen der elektrischen Charakteristik von Transformatorwicklungen zu erkennen. Diese Änderungen können durch mechanische Verschiebungen oder Beschädigungen am Aktivteil verursacht werden. Deshalb wird die SFRA eingesetzt, um den Aktivteil auf mögliche Transportschäden zu untersuchen [14].

Die gebräuchlichste Methode ist es, die Übertragungsfunktion jeder einzelnen Wicklung zu messen. Dabei wird ein sinusförmiges Signal mit geringer Spannung und über einen großen Frequenzbereich angelegt. Gleichzeitig wird die Änderung der Spannung und des Phasenwinkel über den gesamten Frequenzbereich gemessen. Eine Messung wird vor dem Transport im Werk durchgeführt und liefert eine sogenannte Basiskennlinie. Nach dem Transport wird eine zweite Messung durchgeführt, diese liefert die Diagnosekennlinie. Es ist wichtig, dass die Messungen unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden. Das heißt die Messungen werden als letzte Messung vor dem Transport und als erste Messung nach dem Transport durchgeführt. Die beiden Kurvenverläufe werden anschließend in einem

gemeinsamen Diagramm dargestellt und sollten denselben Verlauf aufweisen. Ist dies der Fall, kann davon ausgegangen werden, dass keine Beschädigungen oder Veränderungen am Aktivteil aufgetreten sind [12], [14].

In Abbildung 9 sind zwei SFRA-Messkurven einer Wicklung überlagert. Zwischen den beiden Messungen wurde ein Vibrationstest an dem Transformator durchgeführt. Auf der x-Achse ist in beiden Diagrammen die Frequenz dargestellt. Die y-Achse repräsentiert im oberen Diagramm die Dämpfung und im unteren die Phasenverschiebung. Die rote Kurve wurde vor dem Vibrationstest gemessen, die blaue Kurve nach dem Vibrationstest. Es ist eine geringfügige Abweichung der Messergebnisse vor und nach dem Vibrationstest zu beobachten. Im vorliegenden Fall sind allerdings keine beeinträchtigenden Veränderungen am Aktivteil aufgetreten. Das Ergebnis zeigt, dass die SFRA ein sehr sensibles Werkzeug ist und deshalb geringfügige Abweichungen in der Regel tolerierbar sind. Die Schwierigkeit besteht darin, zu beurteilen ab welchem Wert eine Abweichung nicht mehr zulässig ist.

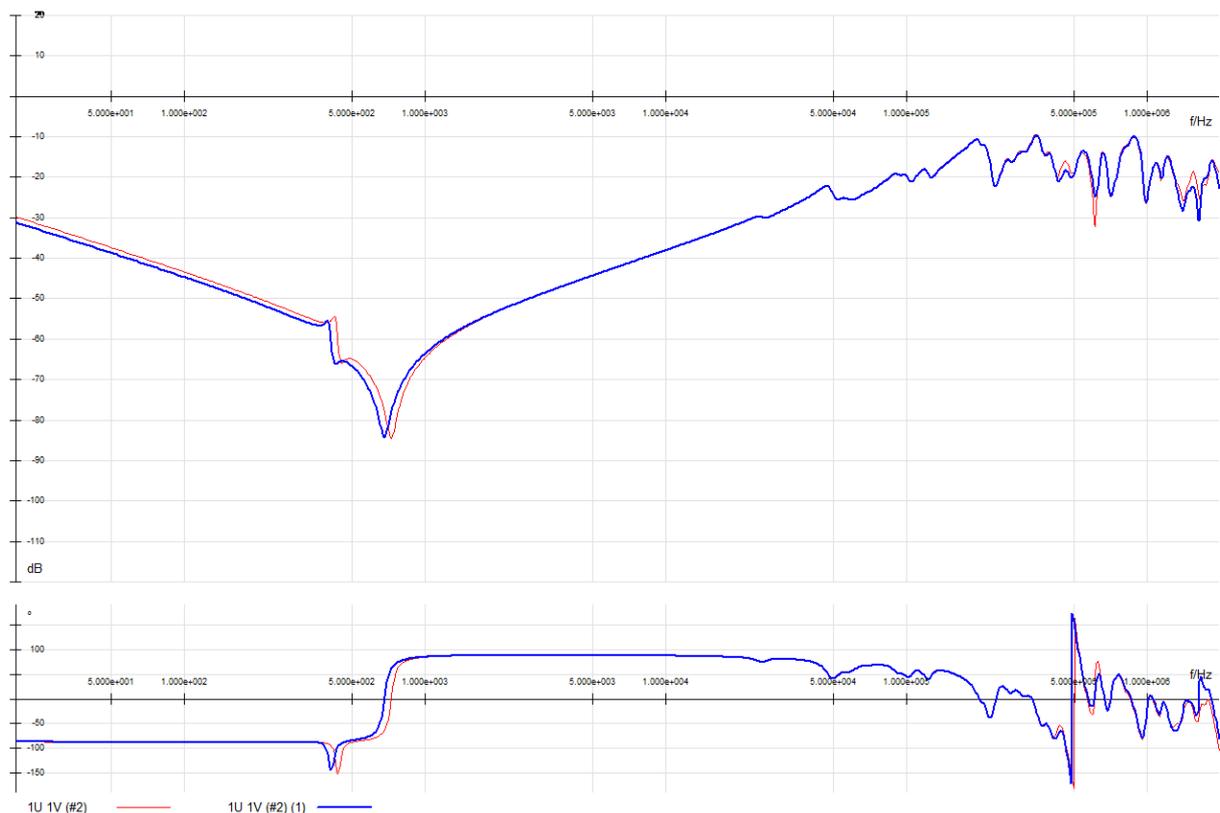


Abbildung 9: SFRA Messung an einer Transformatorwicklung vor und nach einem Vibrationstest. Rot: vor dem Vibrationstest. Blau: nach dem Vibrationstest [1].

3 Aufgabenstellung

Die Masterarbeit mit dem Titel „Transportfestigkeit von Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel“ baut auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Kapitel auf. Das Ziel der Arbeit ist es, die Ursachen für Schäden an Wellwandkesseln nach dem Transport zu ermitteln. Daraus ergeben sich folgende Arbeitspakete:

1. Detaillierte Analyse aller Schadensfälle der letzten Jahre mit dem Ziel, Schwachstellen in der Konstruktion zu finden.
2. Zerstörungsfreie und zerstörende Materialprüfung von Schwachstellen.
3. Erstellung eines allgemeinen 3D-Modells des Kessels, dass für FEM-Berechnungen verwendet werden kann.
4. FEM-Berechnung mit grundlegenden Lastannahmen gemäß IEC 60076-1 zur Ermittlung der am höchsten belasteten Bereiche.

4 Schadensanalyse

4.1 Schäden nach der Auslieferung

Im ersten Schritt wird eine Analyse der Schadensfälle seit 2013 durchgeführt. Der Fokus liegt dabei auf Fällen bei denen mechanische Beschädigungen am Kessel aufgetreten sind. Die Ursache der Schäden ist in den meisten Fällen eindeutig zuordenbar. Allerdings gibt es einige Fälle bei denen Schäden an den Stahlbauteilen, ohne einer direkten äußerlichen Einwirkung, aufgetreten sind. Diese Schäden sind entweder direkt nach der Auslieferung oder innerhalb eines kurzen Zeitraumes danach aufgetreten. Es wird vermutet, dass der Transport bei der Entstehung dieser Schäden eine Rolle spielt. Deshalb werden in diesem Kapitel diverse Schadensfälle erläutert, bei denen ein Zusammenhang mit Transportbelastungen nicht auszuschließen ist. Alle betroffenen Transformatoren haben die internen Routinetests bestanden. Neben den elektrischen Prüfungen wird an jedem Transformator ein Drucktest durchgeführt, um die Systemdichtheit sicherzustellen.

Der erste behandelte Fall ist ein Transformator mit folgenden Eckdaten:

- Länge: 2.160 mm
- Breite: 1.300 mm
- Höhe (bis Deckeloberkante): 2.160 mm
- Isolierflüssigkeitssäule: ca. 1.800 mm

- Gesamtmasse: 6.000 kg
- Leistung: 2 MVA
- Aufstellungsort: Westeuropa

Die Niedervolt- und die Hochvolt durchführungen sind beide seitlich an der Längsseite angebracht. Üblich ist eine Ausführung am Deckel. Das hat zur Folge, dass der Kessel nur auf drei Seiten Wellwände aufweist. Die vierte Seite ist aus ebenem Blech gefertigt und trägt einen Schutzkasten für die Durchführungen.

In Abbildung 10 ist die Draufsicht des Transformators zu sehen. Die roten Linien repräsentieren die Bereiche in denen Schäden aufgetreten sind. Die erste Leckage wurde bei der Wareneingangsinspektion vom Kunden identifiziert. Es handelt sich dabei um eine Leckage im Bereich der Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand. Die schadhafte Stelle wurde notdürftig abgedichtet und der Transformator zur Reparatur in das Werk von STW DT zurücktransportiert. Bei der ersten Kontrolle nach dem Rücktransport wurden sieben weitere Leckagen an derselben Schweißnaht gefunden. Insgesamt sind somit acht undichte Stellen an der Schweißnaht zwischen der Bodenwanne und den Wellwänden entstanden. Allein im Bereich 1 sind fünf Leckagen aufgetreten. Ersichtlich ist der Isolierflüssigkeitsaustritt in Abbildung 11. Die Leckagen traten ausschließlich am Übergang zwischen den Wellwandfinnen und der Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand auf.

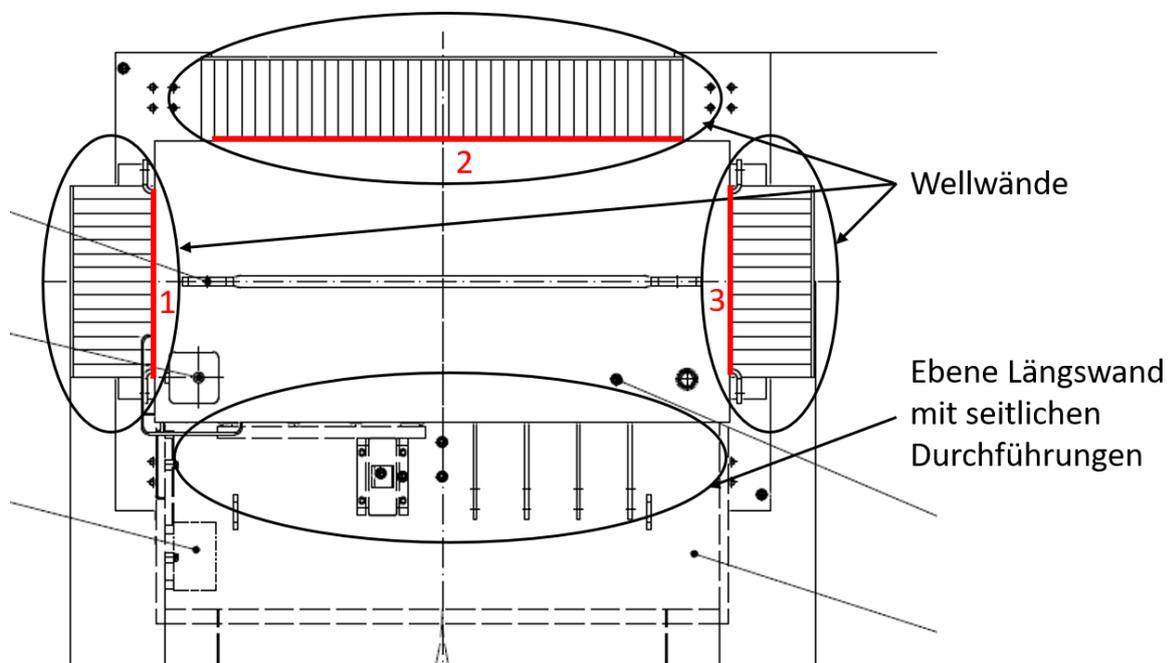


Abbildung 10: Draufsicht des Transformators mit rot eingezeichneten Schadensbereichen [1].



Abbildung 11: Schäden im Bereich 1 [1]

Bei diesem Projekt wurden zwei baugleiche Transformatoren geliefert. Allerdings sind die Schäden nur an einem der beiden Transformatoren aufgetreten. Die Transformatoren wurden auf zwei verschiedenen LKW vom Werk zum Kunden transportiert. Der beschädigte Transformator wurde, als einziges Ladegut, direkt über den Achsen des LKW positioniert. In diesem Bereich sind auch die zu erwartenden Transportbelastungen am höchsten.

Die im Zuge der Reklamation durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die beiden Kessel von unterschiedlichen Schweißern geschweißt wurden. Das ist ein Indiz für qualitative Unterschiede bei der Fertigung der beiden Kessel. Diese qualitativen Unterschiede in Zusammenhang mit Transportbelastungen können zu den Leckagen an der Schweißnaht geführt haben.

In den beschädigten Bereichen dieses Kessels werden in weiterer Folge zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtuntersuchungen durchgeführt. Mehr dazu in Kapitel 5.

Beim zweiten Fall handelt es sich um mehrere baugleiche Transformatoren mit folgenden Eckdaten:

- Länge: 2.200 mm
- Breite: 1.300 mm
- Höhe (bis Deckeloberkante): 1.963 mm
- Isolierflüssigkeitssäule: ca. 1.800 mm

- Gesamtmasse: 6.300 kg
- Leistung: 2 MVA
- Aufstellungsort: Zentralamerika

Eine Besonderheit bei diesem Transformator ist die Mischbauweise aus 1.4301 (Bodenwanne), S235 (alle anderen Teile außer Wellwände und Bodenwanne) und DC01 (Wellwände). Daraus ergeben sich Schweißnähte mit sogenannten schwarz-weiß-Verbindungen. Derartige Verbindungen stellen zusätzliche Herausforderungen an den Schweißprozess. Wichtig ist die Auswahl des richtigen Zusatzwerkstoffes und die Auswahl der richtigen Schweißparameter, da andernfalls die Gefahr der Heißriss- und Kaltrissbildung besteht [15].

Bei diesen Transformatoren sind ebenfalls Schäden im Bereich der Schweißnähte zwischen den Wellwänden und der Bodenwanne aufgetreten. In Abbildung 12 ist die Position einer Leckage an der Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand zu erkennen. Unten im Bild ist die vom Lack befreite Leckagestelle ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass der Riss seinen Ursprung genau am Übergang zwischen Wellwandfinne und Schweißnaht hat. Wie bereits erwähnt treten Risse und damit Leckagen fast ausschließlich in diesem Bereich auf. Es wurden bereits im Vorfeld dieser Arbeit verschiedene Untersuchungen zur Ursachenermittlung durchgeführt:

- Versuche mit Dehnmessstreifen unter Transportbedingungen
- Hebeversuche
- Röntgenfluoreszenzanalyse zur Überprüfung des Schweißzusatzes
- Zyklische Drucktests
- Überprüfung von Spannungen durch thermische Ausdehnung aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten
- Einfache FEM-Berechnung zur Überprüfung der Spannungen in der Schweißnaht

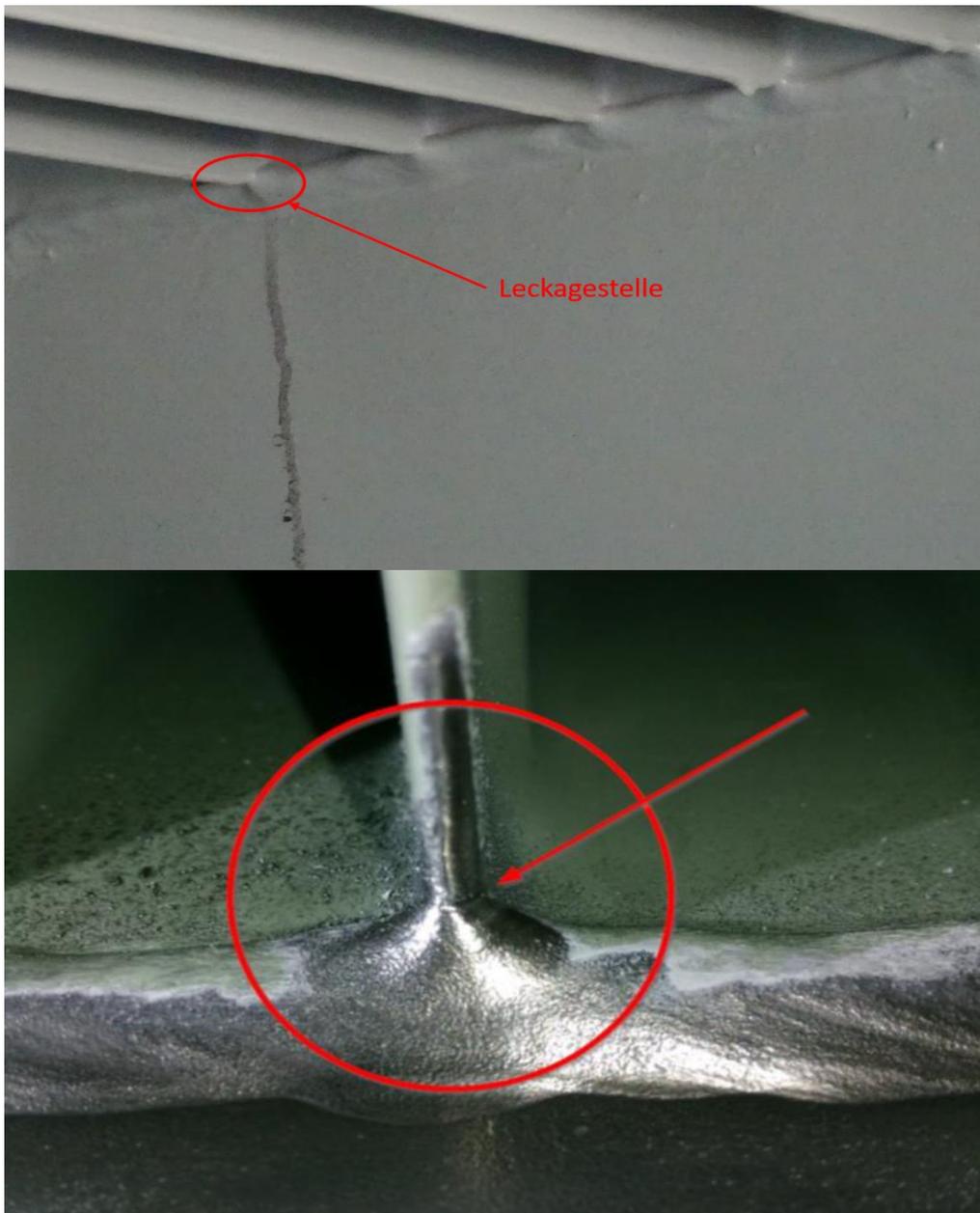


Abbildung 12: Leckagestelle an Wellwand-Bodenwanne Schweißnaht (oben), von Lack befreite Leckagestelle [1]

Die Untersuchungen geht hervor, dass die Probleme durch eine Kombination aus verschiedenen Einflüssen verursacht wurden. Von schweißtechnischer Seite wurde gezeigt, dass aufgrund von Schweißspannungen und ungeeigneten Schweißparametern Mikrorisse am Übergang zwischen Wellwandfinne und Schweißnaht entstanden sind. Diese Risse sind in weiterer Folge durch die Transportbelastungen gewachsen und haben schlussendlich zu Leckagen geführt. Ein derartiger Verlauf erklärt auch die Tatsache, dass bei den internen Tests keine Leckagen aufgetreten sind.

Des Weiteren haben die Nachforschungen gezeigt, dass die Schweißnähte von Schweißern ohne gültige Schweißer-Prüfung, für diese Art von Verbindung, ausgeführt wurden. Zum Zeitpunkt der Fertigung waren auch keine gültigen Verfahrensprüfungen und Schweißanweisungen vorhanden [1].

4.2 Schäden vor der Auslieferung

In diesem Kapitel werden Beispiele für Schäden an Transformatorkomponenten vor der Auslieferung an den Kunden behandelt.

Beim ersten Fall handelt es sich um Schäden beim Transport von leeren Wellwandkesseln:

An mehreren Wellwandkesseln kam es, während dem Transport vom Kesselhersteller zum Transformatorenwerk, zu Beschädigungen an den Versteifungen der Wellwände. In Abbildung 13 sind die gebrochenen Schweißnähte am Übergang zwischen den Wellwänden und deren Versteifungen zu erkennen. Diese Schäden waren an mehreren baugleichen Wellwandkesseln zu beobachten. Die am schwersten beschädigten Kessel wurden direkt über der Achse des LKW transportiert. Wie bereits erwähnt sind dort die höchsten Belastungen durch Stöße und Vibrationen zu erwarten.

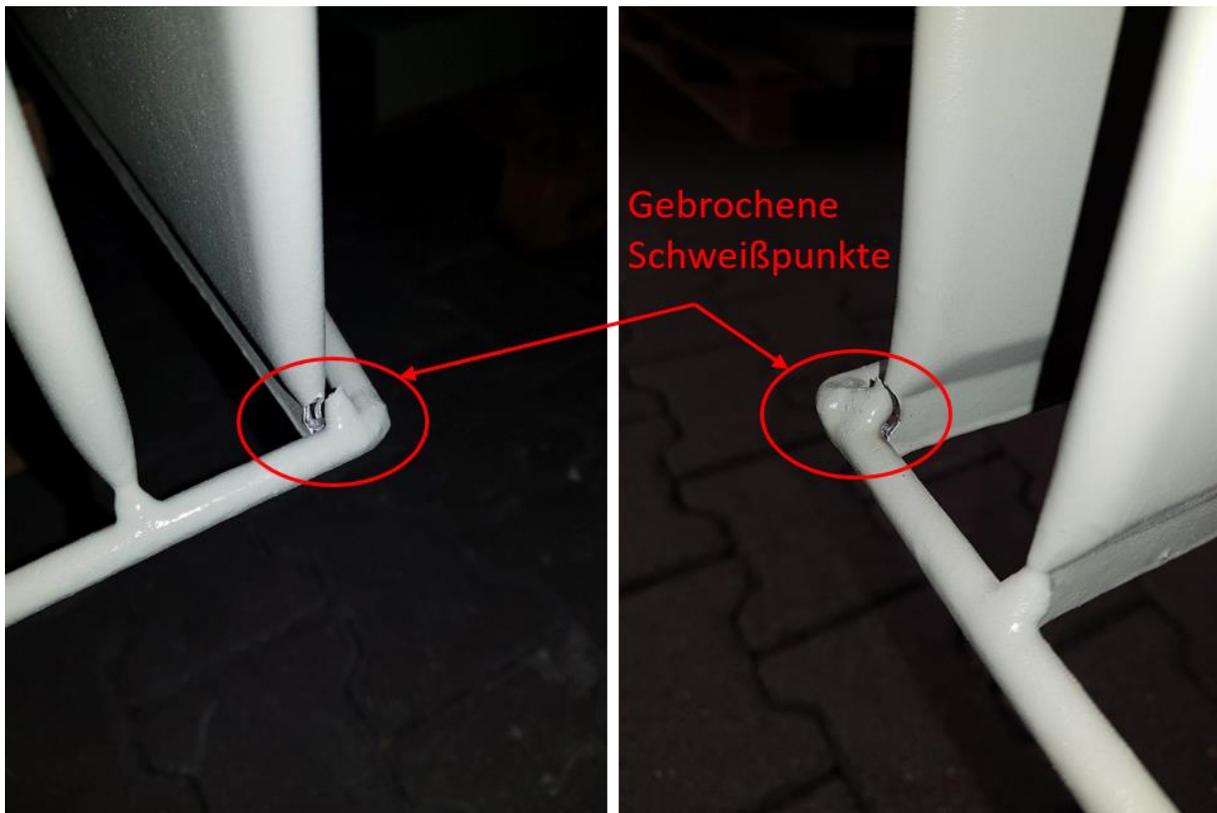


Abbildung 13: Gebrochene Schweißnähte an den Wellwandversteifungen [1]

Beim folgenden Transformator kam es bereits während des Füllprozesses zu Schäden an der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne:

Es handelt sich bei diesem Transformator um einen 6 MVA Transformator mit Dehngefäß. Nach dem Füllprozess sind an dem Transformator Leckagen an der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne aufgetreten. Diese Beschädigungen sind durch die übermäßige Deformation des Kessels infolge des hydrostatischen Druckes im Inneren entstanden. Das Problem in diesem Fall wird verstärkt durch eine spezielle Ausführung der Bodenwanne mit hohen Seitenwänden. Das führt zu einer übermäßigen Verformung im Bereich der Schweißnaht und in weiterer Folge zu Rissen in der Schweißnaht. Die Problematik ist in Abbildung 14 detailliert dargestellt.

Krümmung an Wellwandversteifung
ersichtlich



Abbildung 14: Deformation der Bodenwanne infolge des hydrostatischen Druckes und verformungsinduzierte Leckagen [1].

4.3 Schlussfolgerung aus der Schadensanalyse

Anhand der beschriebenen Beispiele ist ersichtlich, dass sich die Schwachstellen des Wellwandkessels im Bereich der Schweißnähte an den Wellwänden befinden. Insbesondere betroffen ist die Schweißnaht am Übergang zwischen Bodenwanne und Wellwand. In diesem Bereich treffen mehrere Faktoren aufeinander:

- Unterschiedliche Werkstoffqualitäten zwischen Wellwand und Bodenwanne
- Ungünstige Schweißnahtgeometrie
- Steifigkeitssprung

- Schweißspannungen durch behinderte Schrumpfung
- Große Materialdickenunterschiede
- Kreuzung von zwei Schweißnähten
- Druckbelastung abhängig von der Füllstandshöhe der Isolierflüssigkeit
- Zusätzliche Belastungen durch den Transport

Ein weiterer kritischer Bereich befindet sich bei den Versteifungen der Wellwände. Die Problemfaktoren in diesem Bereich sind folgende:

- Es werden kleine Geometrien verschweißt, deshalb sind nur Heftschweißung möglich.
- Die Wellwände sind geometriebedingt sehr flexibel und somit anfällig für Schwingungsanregung durch Vibrationen.
- Verformungen der Wellwände werden direkt auf die Versteifungen übertragen. Dadurch entstehen Spannungen in den Schweißverbindungen.

Aus der Schadensanalyse leiten sich die weiterführenden Untersuchungen ab. Der Fokus wird auf die Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne gelegt. Zur Überprüfung der Schweißnahtqualität werden zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen an Schweißnahtproben durchgeführt. Diese Schweißnahtproben werden direkt aus zwei unterschiedlichen Wellwandkesseln entnommen. Auf Basis der Ergebnisse der Schadensanalyse und der Schweißnahtuntersuchungen werden in weiterer Folge die Aufgaben für die FEM-Berechnung definiert.

5 Zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtuntersuchungen

Wie bei der Analyse der Schadensfälle festgestellt wurde, kommt es hauptsächlich im Bereich der Schweißnähte zu Problemen. Besonders anfällig ist die Schweißnaht zwischen den Wellwänden und der Bodenwanne. Deshalb werden aus den kritischen Bereichen mehrere Proben entnommen und mit Hilfe unterschiedlicher Methoden untersucht. Als Basis für die Untersuchungen dient die Liefervorschrift von STW DT. Laut Liefervorschrift müssen die Schweißnähte gemäß DIN EN ISO 5817 – C ausgeführt sein.

Vorweg werden einige Details zur Geometrie und der Schweißnahtausführung beschrieben. Abbildung 15 zeigt ein Detail der Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand. Angegeben sind die Werte eines später näher untersuchten Transformators (ab Kapitel 6.1). Es ist zu sehen, dass sich in diesem

Bereich zwei Schweißnähte kreuzen. Eine CMT-Schweißnaht an der Wellwandfinne, die im Bild horizontal verläuft und eine MAG-Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne. Das führt dazu, dass keine Standard-Schweißnahtform vorliegt. Es handelt sich um eine Zwischenform aus Schweißnaht am Überlappstoß und Kehlnaht. Die Schweißnaht wird regelmäßig von den Wellwandfinnen unterbrochen. Des Weiteren sind die ungünstigen Materialdickenverhältnisse zwischen Bodenwanne und Wellwand ersichtlich. Die Wellwand wird in der Regel aus DC01 hergestellt. Es handelt sich dabei um einen Tiefziehstahl mit hoher Duktilität. Bei den anderen Stahlbauteilen wird meistens S235 eingesetzt. Der Distanzstreifen wird beigelegt, um wellwandseitig mehr Material zur Verfügung zu stellen. Die richtige Wahl der Schweißparameter ist hier äußerst schwierig. Zum einen wird ein ausreichend hoher Schweißstrom benötigt, um genügend Einbrand in der Bodenwanne zu gewährleisten. Andererseits ist dieser Strom deutlich zu hoch für die dünnen Bleche der Wellwand. Dies führt im schlimmsten Fall zur einem „Durchbrennen“ der Wellwand. Reduziert man allerdings den Schweißstrom, kann das zu Bindefehlern seitens der Bodenwanne führen, was ebenfalls nicht erwünscht ist. Das führt dazu, dass in der Regel mit zu hohen Strömen für die Wellwand geschweißt wird und somit Schweißnahtfehler auf der Wellwandseite in Kauf genommen werden. Diese Fehler werden in weiterer Folge durch Reparaturschweißungen beseitigt. Der verwendete Schweißstrom beträgt zwischen 170 A und 190 A. Für das Verbinden von 1,5 mm Blechen würde man üblicherweise Ströme von ca. 60 A bis 80 A verwenden.

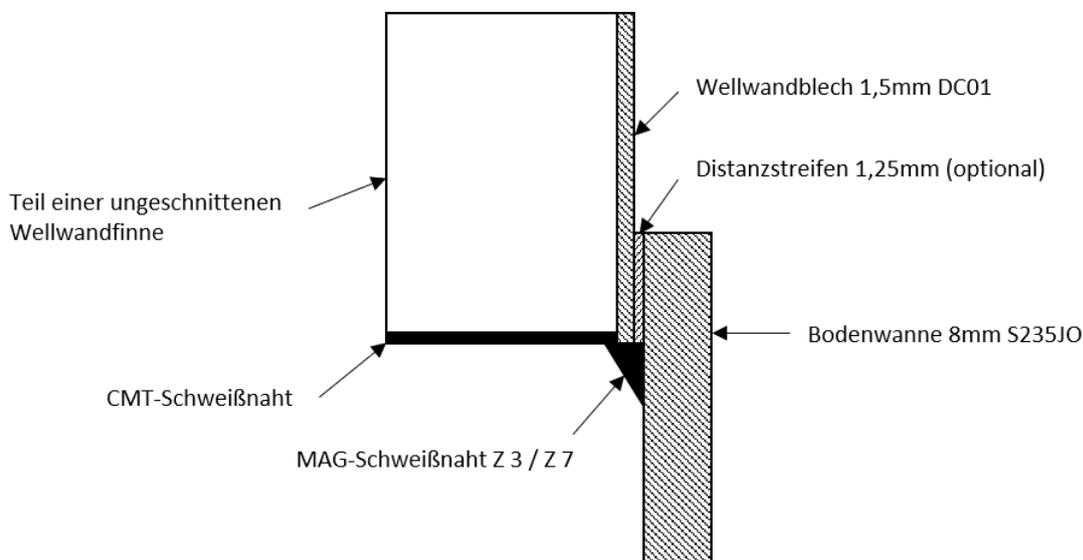


Abbildung 15: Schweißnahtdetail zwischen Bodenwanne und Wellwandfinne

Es werden Proben von zwei unterschiedlichen Kesseln verwendet. Bei einem der beiden Kessel handelt es sich um den bereits beschädigten Kessel des Transformators mit Aufstellungsort Westeuropa (siehe Kapitel 3.1.1). Der zweite Kessel weist im Bereich der Schweißnähte keine Beschädigungen auf und dient deshalb als Referenz.

In Abbildung 16 ist die Probenentnahmestelle an dem jeweiligen Kessel dargestellt. Es wird jeweils ein Teil der Bodenwanne und ein Teil der Wellwand entnommen.

Die Entnahme wird in ausreichend großem Abstand zur Schweißnaht durchgeführt werden, um einen Wärmeeinfluss durch das Trennverfahren zu vermeiden. Damit die Schweißnaht einer Sichtprüfung und einer Farbeindringprüfung unterzogen werden kann, wird der Lack im Bereich der Schweißnaht durch Sandstrahlen entfernt.

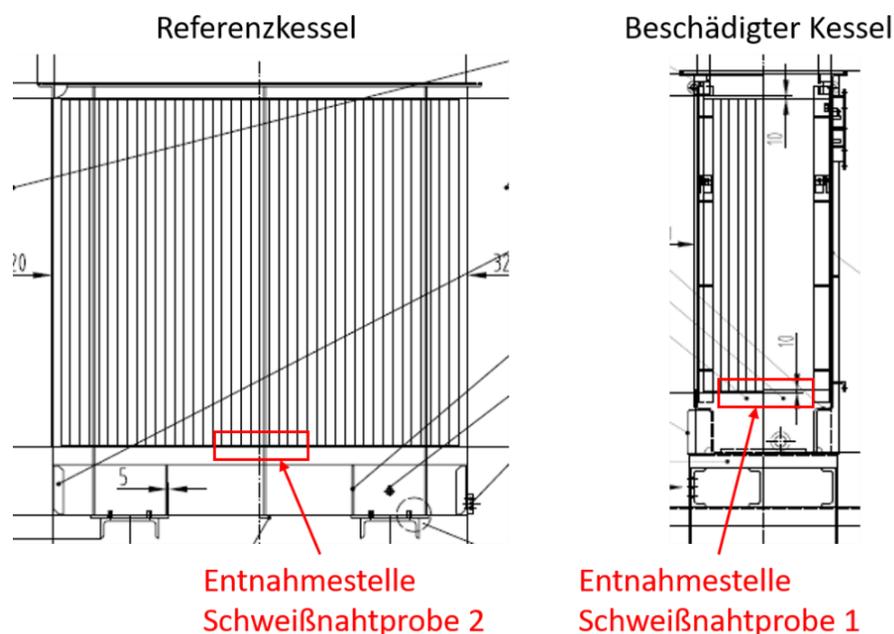


Abbildung 16: Probenentnahmestelle an den beiden Transformatoren [1]

5.1 Sichtprüfung und Farbeindringprüfung

Im ersten Schritt werden die beiden Proben einer Sichtprüfung und darauffolgend einer Farbeindringprüfung unterzogen. Bereits bei der Sichtprüfung fällt auf, dass die Schweißnähte sehr ungleichmäßig ausgeführt sind. Das zeigt sich in diversen Abweichungen im Vergleich zur geforderten Bewertungsgruppe C der Norm. Bei den beiden Proben wurden folgende Abweichungen gefunden (siehe auch Abbildung 17):

- Schroffer Nahtübergang: Laut Norm wäre ein Übergangswinkel $\alpha \geq 110^\circ$ zulässig.
- Durchlaufende Einbrandkerbe: Laut Norm wären maximal 0,5 mm zulässig.
- Generell sehr ungleichmäßige Ausführung der Schweißnaht, speziell im Bereich der Wellwandfalten.
- Bei der Farbeindringprüfung ist an der Schweißnahtprobe 1 eine Anzeige zu erkennen. Die Schweißnahtprobe 2 zeigt bei der Farbeindringprüfung keine Auffälligkeiten.

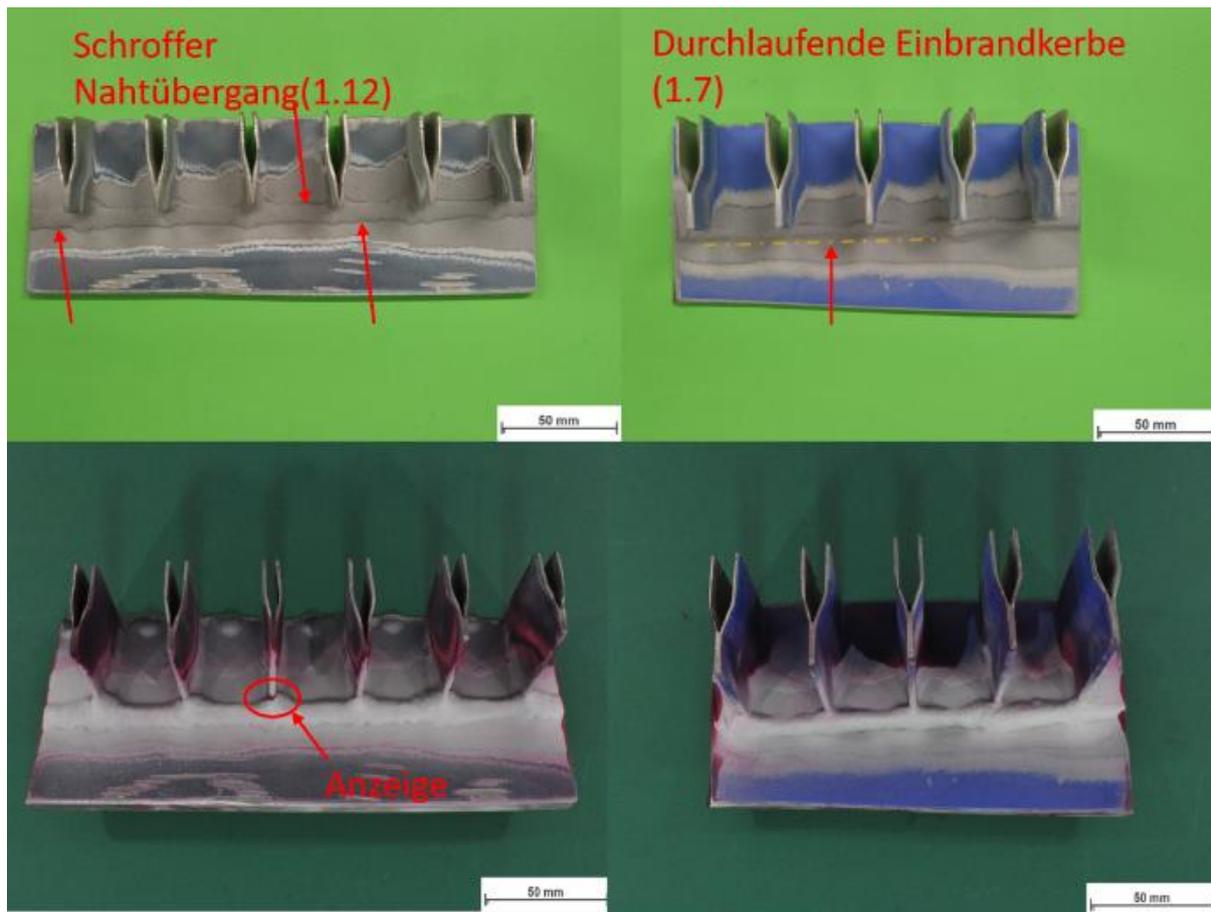


Abbildung 17: VT-Prüfung (oben) der beiden Proben (links Schweißnahtprobe 1, rechts Schweißnahtprobe 2), PT-Prüfung der beiden Proben (unten)

5.2 Schliffvorbereitung

Es werden insgesamt drei Proben für die weiteren Untersuchungen entnommen. Die Entnahme erfolgt mit Hilfe einer Nasstrennanlage, um die Wärmebeeinflussung zu minimieren. Abbildung 18 zeigt im Detail die Trennebenen der jeweiligen Schlitze. Die Schlitze werden in weiterer Folge als Probe 1 bis 3 bezeichnet. Anschließend werden die Proben eingebettet und in mehreren Schritten aufpoliert. Abbildung 19 zeigt Makroaufnahmen der Proben 1 bis 3 im geätzten Zustand. Geätzt wurde mittels Fe-m1. Es handelt sich dabei um ein Gemisch aus 100 ml 96%iges Ethanol und 1-10ml 65%iger Salpetersäure [16]. Es fällt auf, dass beim Referenzkessel die Distanzleiste mitverschweißt wurde. Beim beschädigten Kessel ist diese Distanzleiste nicht vorhanden. Der Abstand zwischen Wellwandfinne und Bodenwanne im Schliff ergibt sich aus den Biegeradien der Wellwand. Zwischen den Wellwandfinnen sind die beiden Bauteile deckungsgleich. Bei Probe 1 und Probe 3 ist, durch die Gefügeunterschiede über den Querschnitt, auf der Makroaufnahme erkennbar, dass an dieser Stelle mehrfach geschweißt wurde. Vermutlich handelt es sich dabei um einen Teil der CMT-Schweißnaht an der Wellwandfinne selbst.

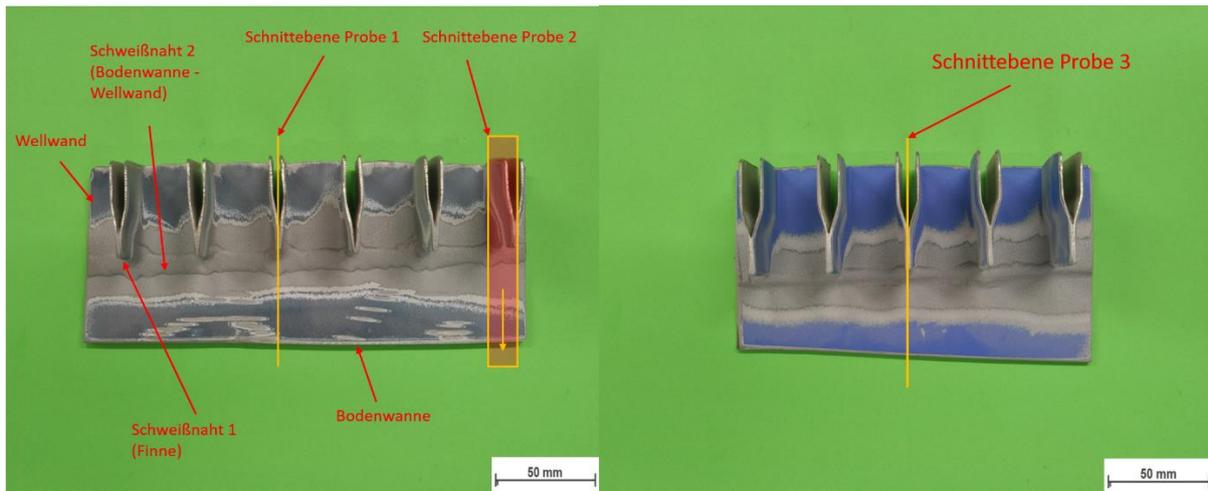


Abbildung 18: Schliffentnahme aus den Schweißnahtproben

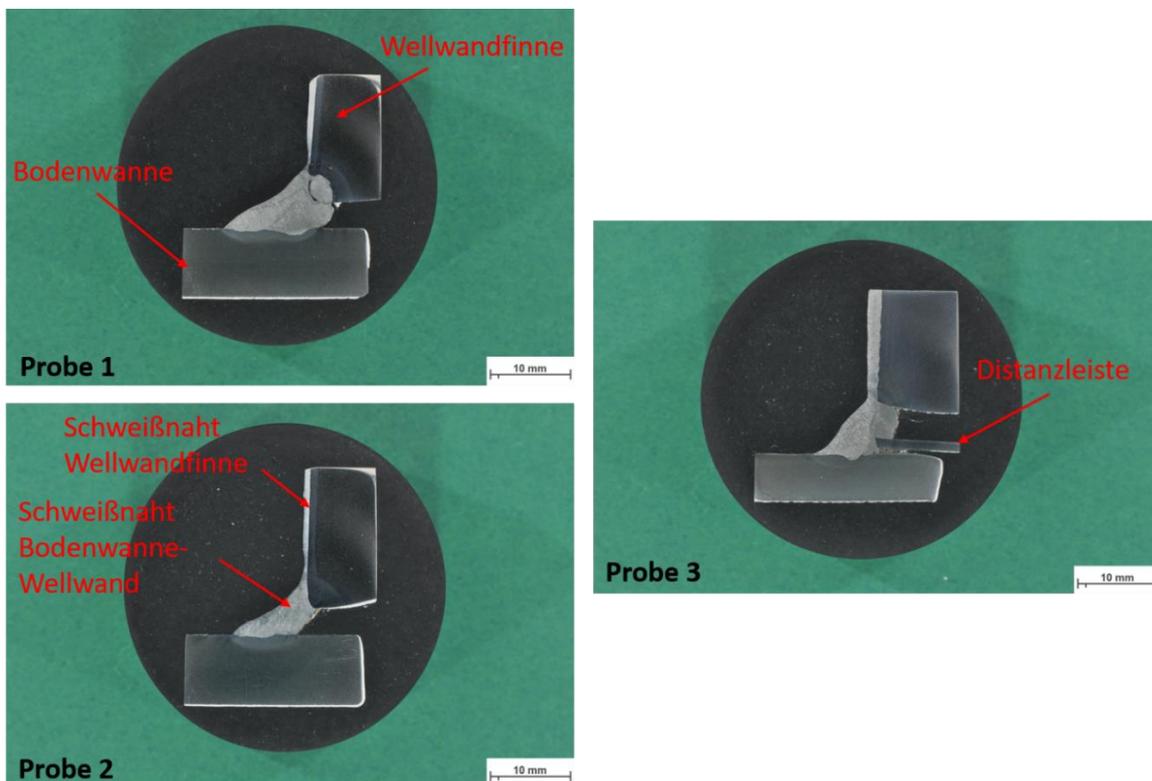


Abbildung 19: Makroaufnahmen der Schliffe

5.3 Mikroskopie

5.3.1 Ungeätzte Aufnahmen

Im ersten Schritt werden die ungeätzten Proben unter dem Lichtmikroskop begutachtet. Dadurch sind Poren, Risse und andere Abweichungen leichter zu erkennen. Gemäß DIN EN ISO 5817 – C sind folgende Abweichungen zu beobachten:

Tabelle 6: Beobachtete Unregelmäßigkeiten.

Abweichung	Wert	Grenzwert	Probe
Gleichmäßig verteilte Porosität	1,5% – 2%	1,5%	1-3
Riss	n.a.	nicht zulässig	1
Mikroriss	n.a.	Eingeschränkt zulässig	2 und 3
Mikro-Bindefehler	n.a.	Zulässig	1-3

Am kritischsten zu bewerten ist gemäß DIN EN ISO 5817 der Riss. Die Schweißnaht in diesem Bereich muss dicht sein, da es sonst zu einem Austritt von Isolierflüssigkeit kommt. Mikrorisse können unter ausreichend großer zyklischer Belastung wachsen und führen, bei entsprechender Größe, zu einer Leckage. Abbildung 20 zeigt Beispiele der gefundenen Abweichungen. Die wahrscheinlichste Ursache für die Porosität ist eine Verunreinigung der Schweißzone mit Ölen und Oxiden.

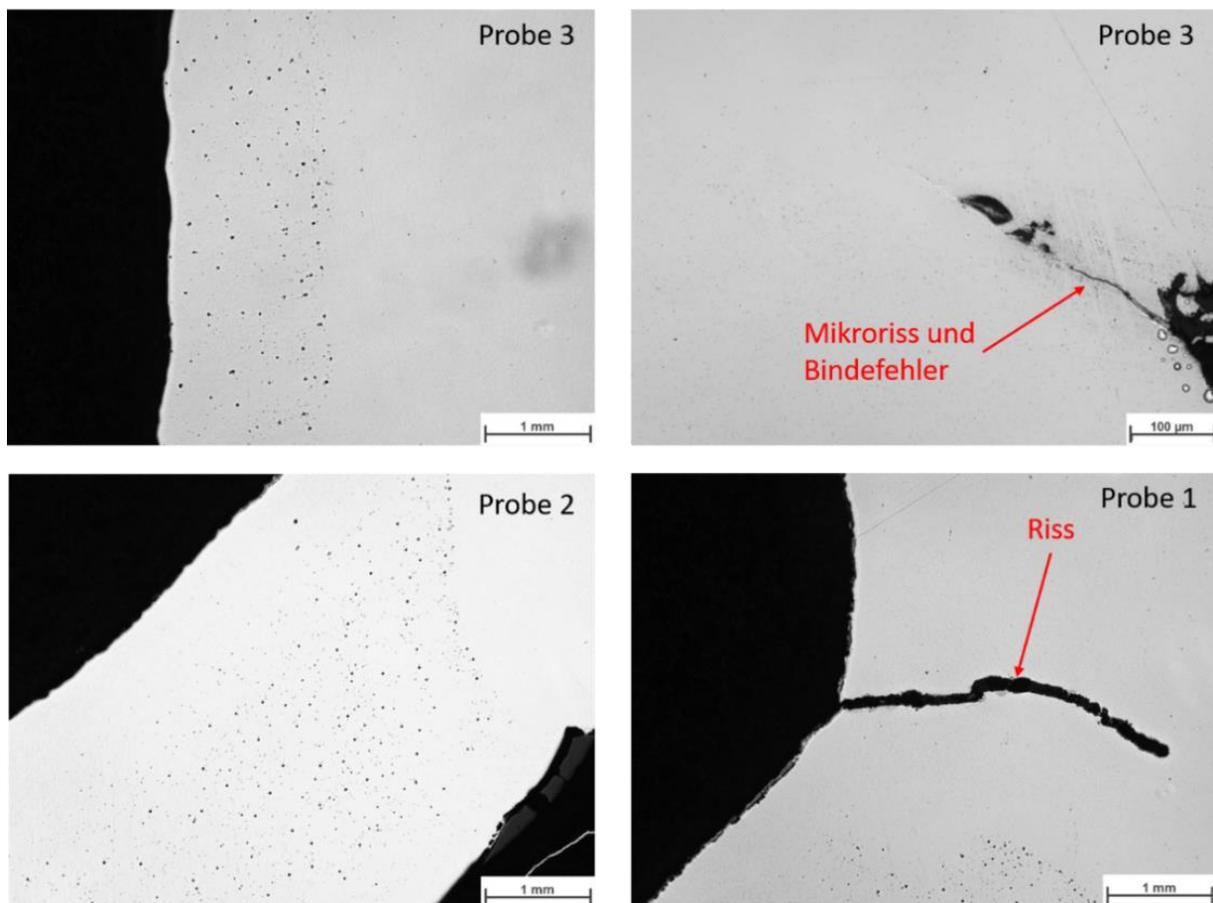


Abbildung 20: Aufnahmen der ungeätzten Proben. Links: Gleichmäßig verteilte Porosität in den Schweißnähten.

5.3.2 Geätzte Aufnahmen

Bei der Untersuchung im geätzten Zustand sind keine Auffälligkeiten am Gefüge zu erkennen. Es liegt wie erwartet ein dendritisches Schweißnahtgefüge, mit entsprechender Wärmeeinflusszone im Randbereich der Schweißnähte, vor [17]. Interessant ist die Stelle des Risses in Probe 1. Abbildung 21 zeigt, dass der Riss genau am Übergang zwischen der Schweißnaht der Wellwandfinne und der Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand entstanden ist. Die weitere Rissausbreitung erfolgte danach in den Grundwerkstoff der Wellwandfinne.

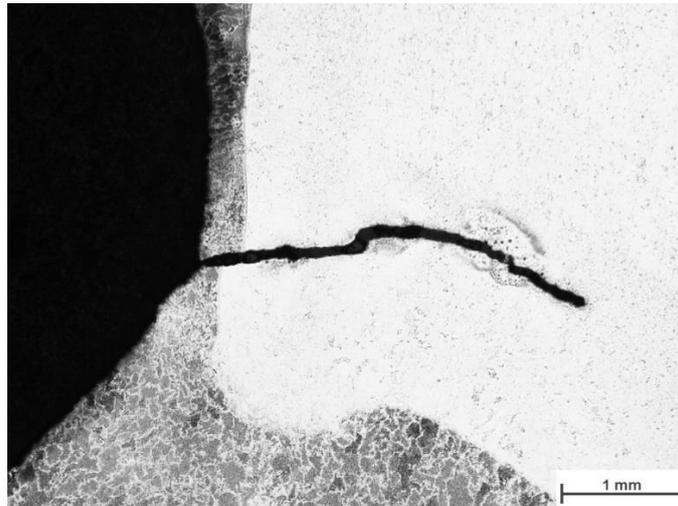


Abbildung 21: Probe 1 mit Riss am Übergang zwischen Schweißnaht der Wellwandfinne und Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand

5.3.3 Härtemessungen HV10

Die Härte wird nach dem Vickers-Verfahren bestimmt. Die Prüfkraft beträgt für die Messung 10 N. Es ist ein Härteanstieg vom Grundwerkstoff in das Schweißgut zu beobachten. Die maximale Härte beträgt 212 HV10 im Schweißgut. Die kleinste gemessene Härte beträgt 106 HV10 im Grundwerkstoff der Wellwand. Beide Werte sind nicht auffällig und stellen kein Problem dar. In Abbildung 22 ist die Härtemessung an Probe 1 dargestellt. Die beiden anderen Proben wurden im selben Bereich geprüft. Der größte Härteanstieg ist bei Probe 2 zu beobachten.

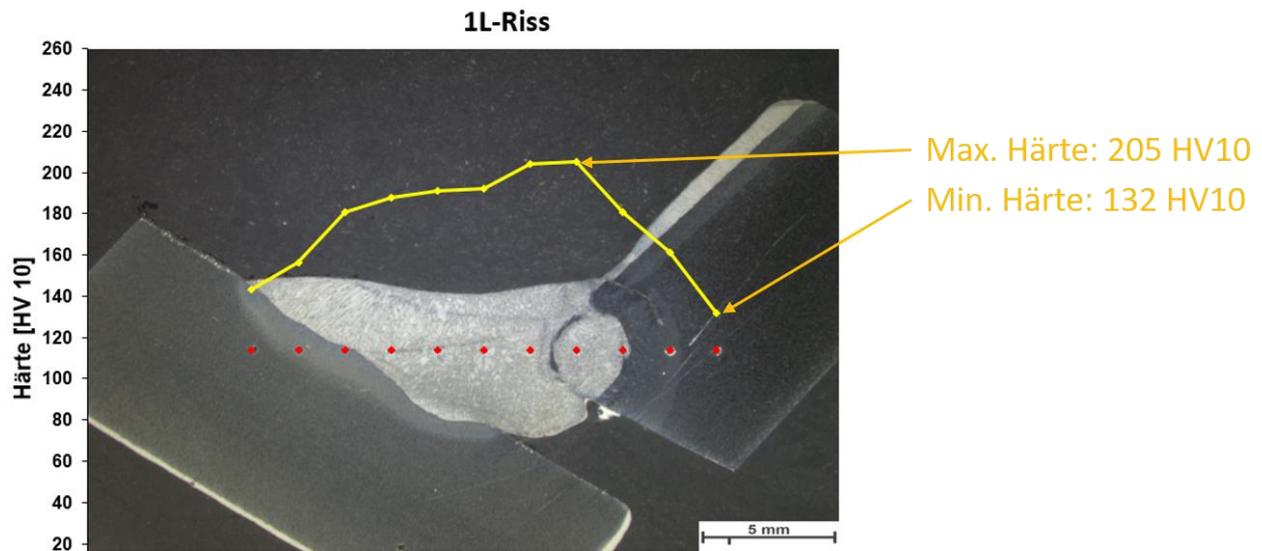


Abbildung 22: Härtemessung HV10 an Probe 1

5.4 Schlussfolgerung aus den Schweißnahtuntersuchungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Schweißnahtgeometrie und die Bauteilpaarung ungünstig sind. Das führt dazu, dass die Schweißnähte anfällig für Fehler sind. Besonders anfällig ist die Kreuzung der Schweißnaht der Wellwandfinne und der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne. Die Gründe dafür sind folgende:

- Steifigkeitssprung im Bereich der Schweißnaht durch die unterschiedlichen Materialstärken und Geometrien.
- Kerbwirkung durch die Überlappung der Schweißnähte.
- Sehr dünne Schweißnaht an der Wellwandfinne und dadurch geringer Restquerschnitt bei Rissentstehung in diesem Bereich.
- Die Schweißnaht wird mit zu hoher Schweißstromstärke für die Wellwand geschweißt.
- Schweißspannungen durch sich kreuzende Schweißnähte.
- Begünstigung von Mikrorissen und Bindefehlern an der Innenseite durch den Überlappstoß.

Sowohl die Schadensanalyse als auch die Materialprüfungen zeigen, dass im Bereich der untersuchten Schweißnähte eine Häufung von Fehlern auftritt. Besonders hervorzuheben ist die offensichtliche Anfälligkeit für Risse im Übergangsbereich zwischen den beiden Schweißnähten. In weiterer Folge wird deshalb eine FEM-Berechnung an einem Wellwandkessel durchgeführt. Die FEM-Berechnung soll in erster Linie zeigen ob es sich um ein reines Qualitätsproblem handelt, oder ob auch die Spannungen

im Bereich der Schweißnähte kritisch sind. Da Transportbelastungen in der Regel zyklisch auftreten, wird abschließend auch auf das Thema Materialermüdung eingegangen.

6 3D-Modellerstellung und FEM-Berechnung

Für die FEM-Berechnung wird zunächst ein geeignetes 3D-Modell des Wellwandkessels und des Aktivteiles benötigt. An diesen 3D-Modellen können in weiterer Folge die angenommenen Lasten angesetzt werden. Das Modell des Aktivteiles dient in erster Linie zur Berechnung der Reaktionskräfte auf den Kessel. Die 3D-Modelle für die FEM-Berechnung werden in PTC CREO 4 erstellt. Für die FEM-Berechnungen selbst wird das Programm ANSYS Workbench 19.2 verwendet. Es handelt sich dabei um eine weitverbreitete Softwarelösung für strukturelle Simulationen [18]. Die Berechnungen werden im Modul „Statisch-mechanische Analyse“ durchgeführt.

Anfangs wird in diesem Kapitel die Erstellung der 3D-Modell beschrieben. Anschließend wird die FEM-Berechnung anhand der ungünstigsten Lastfälle an Kessel und Aktivteil erläutert. Die Ergebnisse der kritischen Lastfälle werden anschließend verglichen und diskutiert. Folgende FEM-Berechnungen werden durchgeführt:

- Reaktionskraftberechnung am Aktivteil.
- Kessel mit vier Versteifungen zwischen Bodenwanne und Fahrgestellträger zur Verstärkung des Einzuges der Bodenwanne.
- Kessel mit acht Versteifungen zwischen Fahrgestell und Bodenwanne und einem Blechgurt (80/8 mm) zur Verringerung der Ausbauchung der Bodenwanne.
- Kessel mit acht Versteifungen zwischen Fahrgestell und Bodenwanne und einem Formrohrgurt (80/20/3 mm) zur Verringerung der Ausbauchung der Bodenwanne.

Mit je drei Lastfällen ergeben sich daraus in Summe zwölf unterschiedliche FEM-Berechnungen. Für die drei Kesselvarianten werden in den kritischen Bereichen Submodellberechnungen durchgeführt. Das ermöglicht lokal eine detailliertere Spannungsauswertung.

6.1 Auswahl eines geeigneten Transformators

Die FEM-Berechnungen sollen an einem Transformator für Photovoltaikanlagen durchgeführt werden. Der Transformator weist die folgenden relevanten Eckdaten auf:

- Hermetisches Kesseldesign → kein Dehngefäß
- Leistung: 5 MVA
- Gesamtmasse: 11.750 kg

- Masse des Aktivteils: 5.400 kg
- Dichte der Isolierflüssigkeit: 880 kg/m³ [19]
- Höhe der Isolierflüssigkeitssäule: ca. 2.040 mm

Von dem Transformator wird in weiterer Folge ein vereinfachtes 3D-Modell erstellt. Das ist notwendig damit für die FEM-Berechnung ein qualitativ hochwertiges Netz erstellt werden kann. Es wird versucht hauptsächlich Hexaeder-Elemente zu verwenden. Dadurch wird der Berechnungsaufwand deutlich verringert. Transformatoren für Photovoltaikanlagen weisen in der Regel einige konstruktive Besonderheiten auf. Diese werden entfernt und das Kesseldesign an den Werkstandard angeglichen.

6.2 Erstellung von 3D-Modellen für die FEM-Berechnung

Für die weitere Bearbeitung mit einem FEM-Programm muss die Geometrie des Wellwandkessel deutlich vereinfacht werden. Abbildung 23 zeigt, dass die Geometrie im CAD-Modell sehr detailliert dargestellt ist. Des Weiteren sind sämtliche elektrische Komponenten, wie Durchführungen und Schutzgeräte, in dem Modell enthalten. Diese werden für die FEM-Berechnung vernachlässigt, da die Massen im Vergleich zur Gesamtmasse sehr gering sind. Hinzukommt, dass einige Details nicht dem derzeitigen Standard entsprechen. Diese Abweichungen werden, wie bereits erwähnt, an den Werkstandard angeglichen.

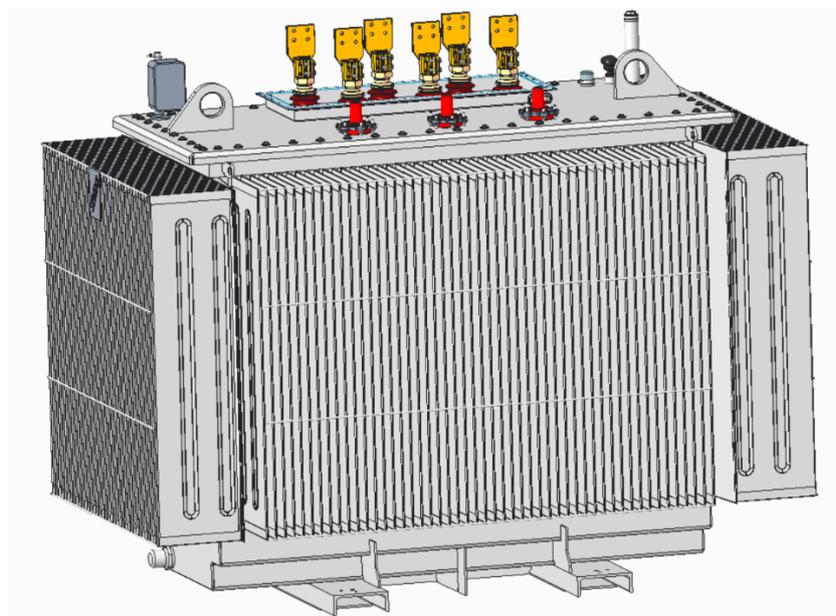


Abbildung 23: CAD-Modell des untersuchten Transformators [1]

Im ersten Schritt wird die Geometrie der Wellwände vereinfacht. Bei der Wellwand handelt es sich um ein komplexes Bauteil mit Sicken, Prägungen und Schweißnähten. Diese Geometriedetails haben für

die weitere FEM-Berechnung, aus Sicht der Gesamtsteifigkeit, keinen großen Einfluss und werden deshalb im 3D-Modell nicht berücksichtigt. Die vereinfachten Wellwände weisen ausschließlich rechtwinkelige Geometrien mit einer einheitlichen Dicke von 1,5 mm auf. In Abbildung 24 ist eine Detailansicht der vereinfachten Wellwände dargestellt.

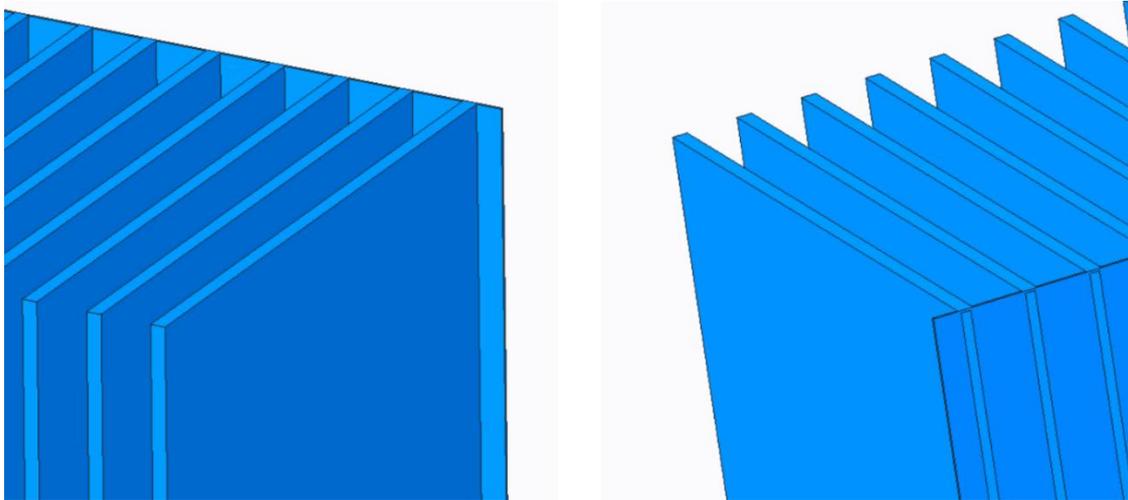


Abbildung 24: Wellwände mit vereinfachter Geometrie. Links Außenansicht. Rechts Innenansicht.

Bei den anderen Bauteilen werden sämtliche Biegeradien und nicht relevante Bohrungen entfernt. Des Weiteren wird die Konstruktion an die Standardkonstruktionsvorschriften angeglichen. Die runden Versteifungen an den Wellwänden werden durch quadratische mit gleicher Querschnittsfläche ersetzt. Im kritischen Bereich zwischen Wellwand und Bodenwanne wird die Schweißnaht mit Hilfe eines dreieckigen Profils angenähert. Die Distanzleiste wird ebenfalls als eigenes Bauteil zwischen Bodenwanne und Wellwand modelliert. In Abbildung 25 sind die Vereinfachung der Wellwandversteifung und die Modellierung der Schweißnaht dargestellt.

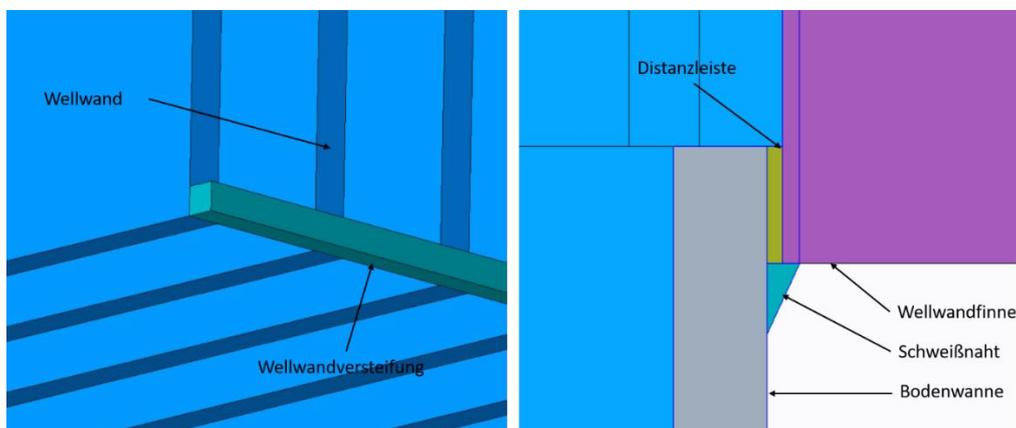


Abbildung 25: Details von Wellwandversteifung und Schweißnahtmodellierung

Abbildung 26 zeigt das vollständige Kesselmodell mit allen durchgeführten Vereinfachungen. Das Modell ist parametrisch aufgebaut. Es können somit die Hauptabmessungen variiert werden. Das hat den Vorteil, dass das Modell für Transformatoren unterschiedlicher Leistungsklassen verwendet werden kann. Da das grundlegende Design standardisiert ist, müssen in der Regel nur kleine Änderungen an den Versteifungen vorgenommen werden.

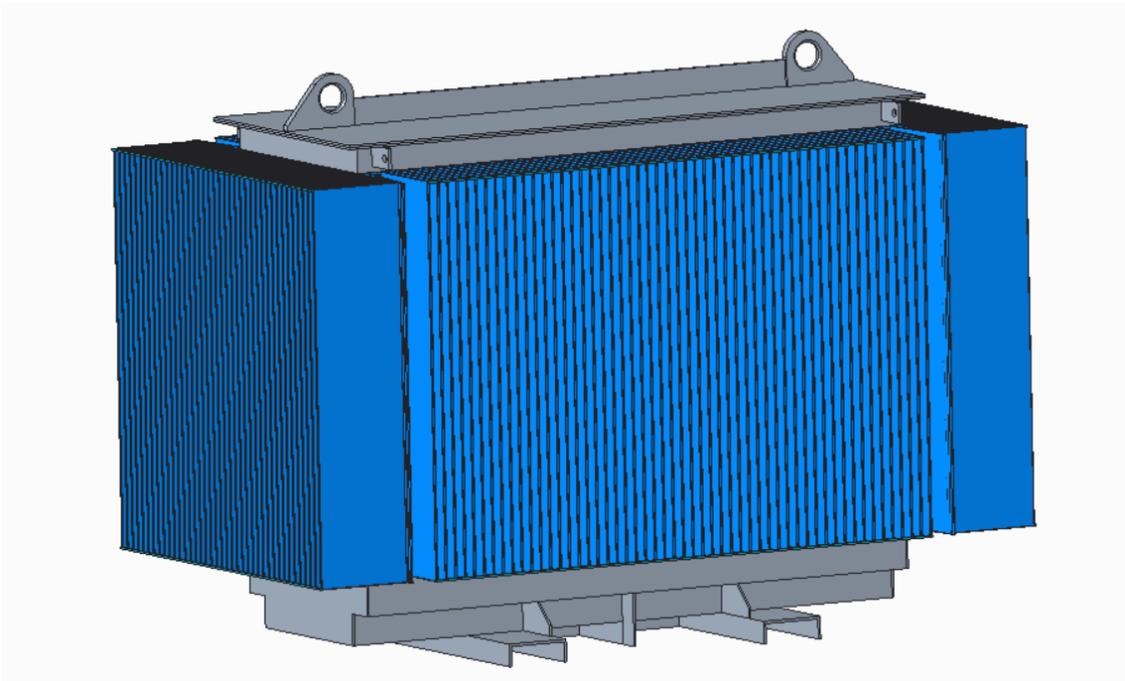


Abbildung 26: Vereinfachter Wellwandkessel für Berechnung

Zusätzlich zum Kesselmodell wird für die FEM-Berechnung ein Ersatzmodell für den Aktivteil benötigt. Dieses 3D-Modell des Aktivteiles dient zur Berechnung der Reaktionskräfte auf den Kessel. In Abbildung 27 ist das Ersatzmodell für den Aktivteil als Explosionsansicht dargestellt. Um den FEM-Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird der Kern mit den Wicklungen vereinfacht als Quader angenommen. Dem Quader wird für die FEM-Berechnung eine entsprechende Dichte zugewiesen. Der Aktivteil ist mit Hilfe von vier M20 Gewindestangen mit dem Deckel verbunden. Um bei der späteren FEM-Berechnung eine realistische Kontaktsituation sicherzustellen, wird ein Teil der Bodenwanne in das Ersatzmodell eingefügt.

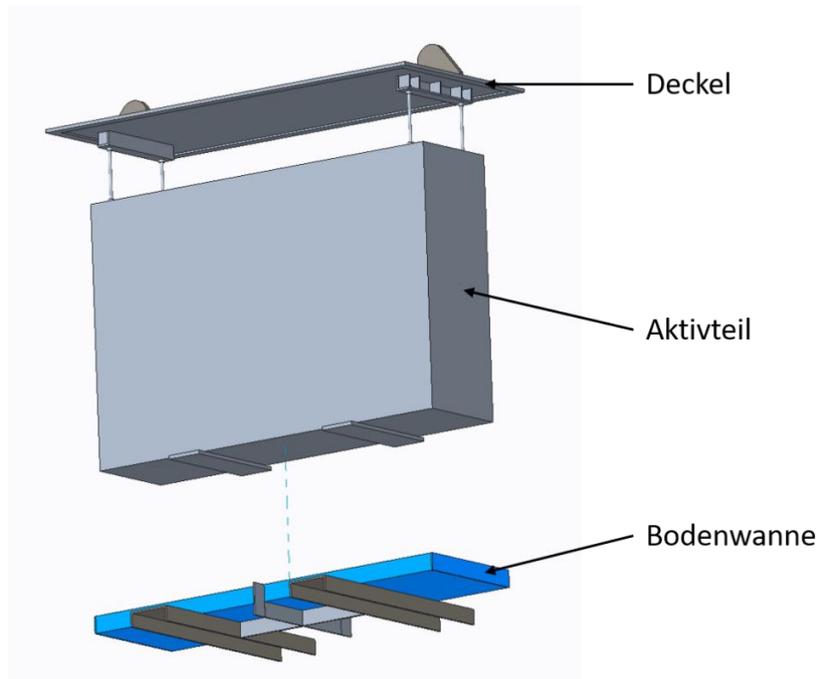


Abbildung 27: Ersatzmodell für Aktivteilberechnung

6.3 Versteifungsvarianten am Kessel

Es werden insgesamt drei Kesselvarianten mit unterschiedlichen Versteifungen, zur Verringerung der Spannungen in den gefährdeten Bereichen, untersucht. Die drei unterschiedlichen Varianten sind in Abbildung 28 gegenübergestellt. Im obersten Bild ist die Variante mit vier Versteifungen zur Verstärkung der Abstufung der Bodenwanne dargestellt. Die zweite Variante, in der Bildmitte, besteht aus vier senkrechten und vier um 30° geneigten Versteifungen mit einem zusätzlichen Blechgurt. In Variante drei wird anstelle des Gurtes aus Blech ein Formrohr verwendet.

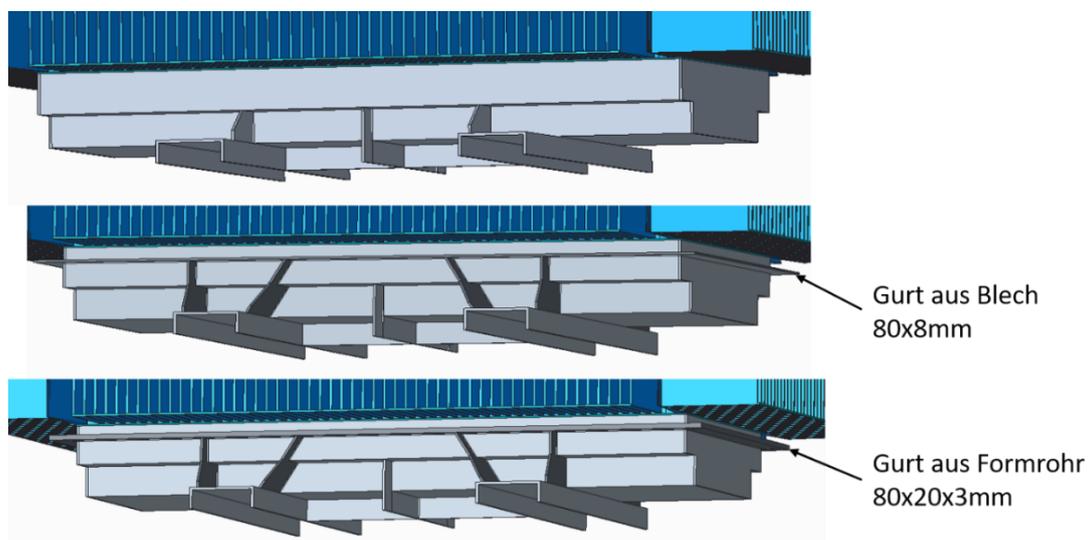
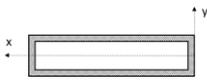


Abbildung 28: Verschiedene Versteifungsvarianten

Die Aufgabe der Versteifungen ist es, die Verformung der Bodenwanne zu verringern. Es wird angenommen, dass eine große Verformung im Bereich der Bodenwanne zu hohen Spannungen in der Schweißnaht zwischen der Wellwand und der Bodenwanne führt. Wird diese Verformung vermindert, sollte das eine Verringerung der Spannungen in der Schweißnaht bewirken. Der Vorteil des Formrohres gegenüber dem Blechgurt liegt in dem höheren Widerstandsmoment gegen Torsion bei geringerer Masse. Eine Verringerung der Masse wirkt sich direkt auf die Kosten des Kessels aus. In Tabelle 7 sind die Querschnittswerte der beiden Gurte gegenübergestellt.

Tabelle 7: Vergleich von Flächenträgheitsmoment und Masse von Formrohr- und Blechgurt.

Geometrie	I_y [mm ⁴]	I_x [mm ⁴]	Masse [kg/lfm]
 Formrohr	1.282.814	36.079	4,427
 Blechgurt	1.365.333	3.413	5,024

6.4 Grundlegende Annahmen für die FEM-Berechnung

Die Berechnungen werden unter Annahme großer Verformungen und plastischem Materialverhalten durchgeführt. Das Konvergenzkriterium wird mit 5 % Veränderung zum letzten Lastschritt festgelegt. Aufgrund großer Verformungen, plastischem Materialverhalten und der Kontaktsituation handelt es sich um nichtlineare Berechnungen. Dadurch werden möglichst realitätsnahe Ergebnisse erreicht.

Nichtlinearitäten werden durch folgende Einflüsse hervorgerufen:

- Öffnender oder schließender Kontakt
- Nichtlineares Material
- Geometrische Nichtlinearität

In Abbildung 29 ist der Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Analyse dargestellt. Bei linearem Verhalten ergibt sich bei einer Verdoppelung der Last eine Verdoppelung der Verformung. Bei nichtlinearem Verhalten gilt dieser Zusammenhang nicht mehr. Deshalb werden nichtlineare Berechnungen in mehreren Schritten, also iterativ durchgeführt. Das führt in der Regel zu einer deutlich erhöhten Berechnungszeit [18].

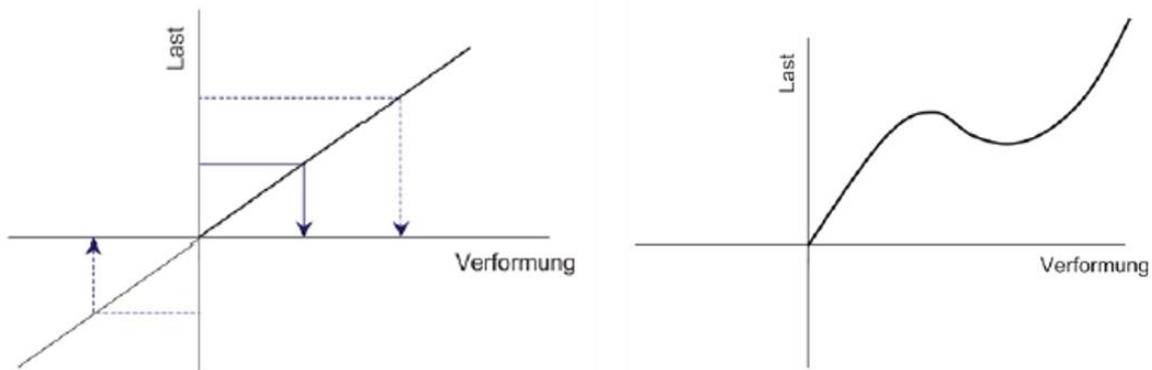


Abbildung 29: Gegenüberstellung von linearer und nichtlinearer Analyse. Links linear, rechts nichtlinear. [18]

1) Kontakte:

Zwischen Bodenwanne und Aktivteil besteht ein reibungsbehafteter Kontakt. Der Reibwert wird mit $\mu = 0,2$ angenommen. Das entspricht dem doppelten der Gleitreibungszahl für Stahl auf Stahl geschmiert [20]. Durch die wirkende Beschleunigung gleitet der Aktivteil in der Bodenwanne, bis ein Kontakt mit der Seitenwand der Bodenwanne hergestellt wird. Dieser Effekt wird durch reibungsfreie Kontakte zwischen den jeweiligen Partnern berücksichtigt. Die Kontakte werden zwischen den in Abbildung 30 dargestellten Flächen hergestellt. Die beiden oben im Bild in grün dargestellten Flächen sind relevant für die Querbeschleunigung. Die unten dargestellten Flächen für die Längsbeschleunigung.

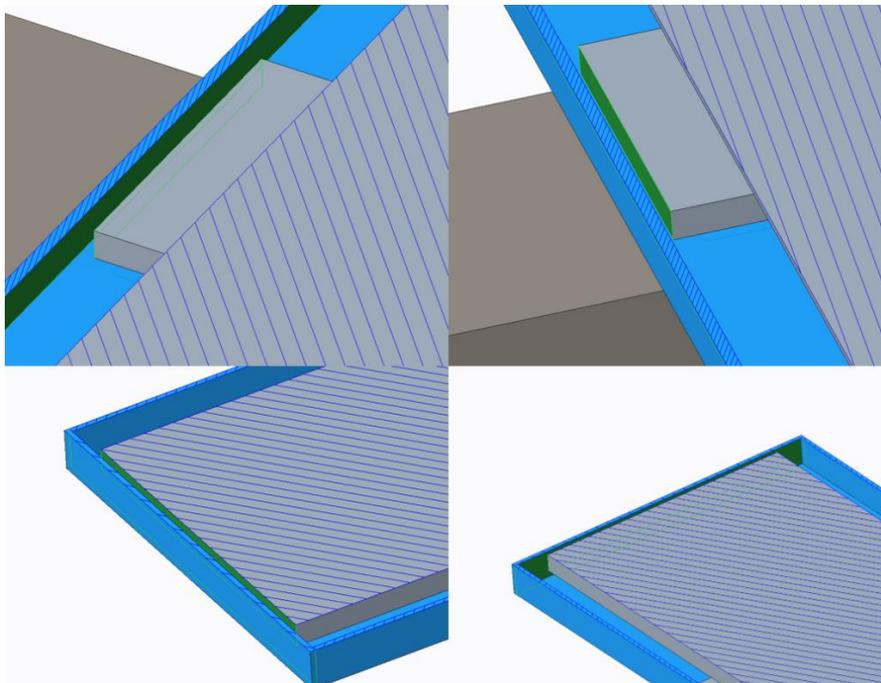


Abbildung 30: Kontaktflächen zwischen Aktivteil und Bodenwanne. Oben: Kontakt zwischen Bodenplatten und Bodenwanne bei Querbeschleunigung. Unten: Kontakt zwischen Aktivteil und Bodenwanne bei Längsbeschleunigung.

Am Übergang zwischen der Distanzleiste und den Wellwänden wird ein reibungsfreier Kontakt angenommen, da die Bauteile nur im unteren Bereich miteinander verschweißt sind. Alle anderen Kontakte werden als Verbund angenommen. Siehe hierzu Abbildung 31.

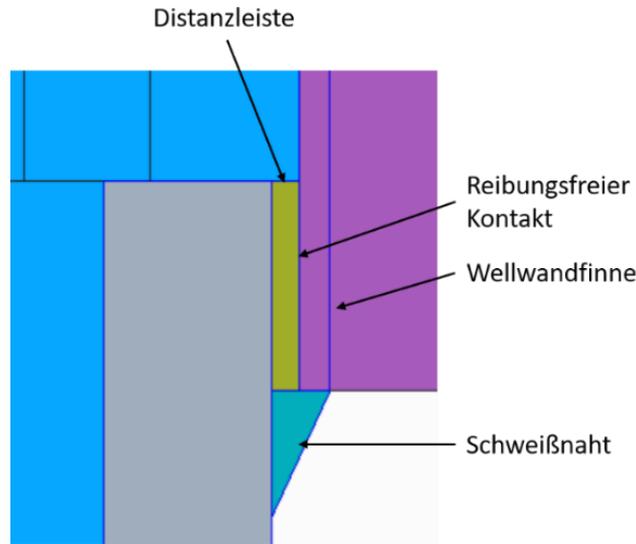


Abbildung 31: Reibungsfreier Kontakt zwischen Distanzleiste und Wellwand

2) Plastisches Materialverhalten

Als Materialgesetz kommt die bilineare Verfestigung zur Anwendung. Das bedeutet, das Material verformt sich bis zum Erreichen der Fließgrenze linear-elastisch entlang der Hookeschen Geraden. Danach verformt es sich linear-plastisch entsprechend eines vorgegebenen Tangentenmodul. In Abbildung 32 ist das bilineare Materialgesetz dargestellt.

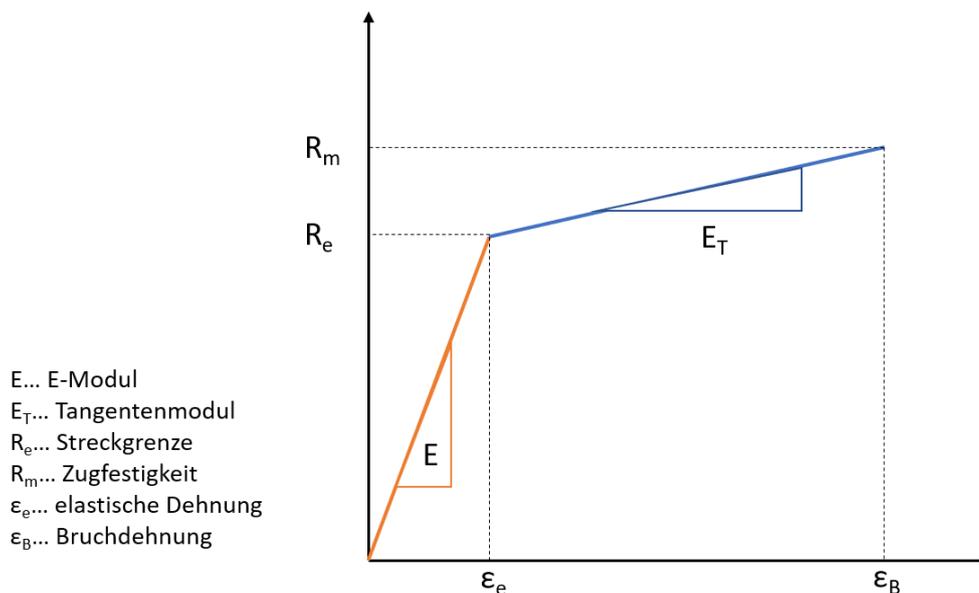


Abbildung 32: Bilineares Materialgesetz

Der Tangentenmodul E_T ergibt sich aus folgender Formel:

$$E_T = \frac{R_m - R_e}{\epsilon_B - \frac{R_e}{E}} \quad (3)$$

Für R_m müssen die wahren Spannungen verwendet werden. Die Werte aus dem Zugversuch sind auf den Ausgangsquerschnitt bezogen. Dieser verringert sich allerdings aufgrund der Querdehnung unter Lasteinwirkung. Das heißt die tatsächlichen Spannungen sind höher. Für R_e kann dieser Effekt vernachlässigt werden, da die Querdehnung im elastischen Bereich noch sehr gering ist. Diese Spannungen können näherungsweise gemäß folgender Formel berechnet werden [18]:

$$R_{m,tats} = R_m(1 + \epsilon_B) \quad (4)$$

Aus diesen Überlegungen ergeben sich die Werte in Tabelle 8Tabelle 1. Diese Werte werden für die FEM-Berechnungen in ANSYS Workbench importiert.

Tabelle 8: Werkstoffkennwerte für bilineare Verfestigung [21][22].

Werkstoff	R_e [N/mm ²]	$R_{m,tats}$ [N/mm ²]	ϵ_B [%]	E_T [N/mm ²]
S235	235	435	21	960
DC01	210 (aus Zugversuchen)	452	35	694
Festigkeitsklasse 8.8 (Jochzugbolzen)	640	896	12	2189

3) Geometrische Nichtlinearität

Die geometrische Nichtlinearität wird durch die Solver-Steuerung „große Verformungen“ in ANSYS Workbench berücksichtigt. Dadurch wird auf einen iterativen Solver zurückgegriffen. Dieser lässt die Änderung der Lastsituation und der Steifigkeit aufgrund von Verformungen in das Ergebnis einfließen [18].

6.5 Vernetzung

6.5.1 Aktivteil

Bei der Vernetzung des Aktivteils wurde darauf geachtet, das Netz global so grob wie möglich zu gestalten, um den Berechnungsaufwand zu minimieren. Aufgrund der vereinfachten Geometrie ist es

möglich das gesamte Modell mit Hexaedern zu vernetzen. Das wirkt sich ebenfalls positiv auf den Berechnungsaufwand aus. Lediglich in den Kontaktbereichen und an den Jochzugbolzen wurde ein feineres Netz erstellt. Das begünstigt die Genauigkeit der Kontaktfindung und eine realistische Steifigkeit der Jochzugbolzen [18]. In Abbildung 33 sind Details der Vernetzung am Aktivteil dargestellt. Für das Netz ergeben sich folgende Eckdaten:

- Anzahl der Elemente: 46.000
- Anzahl der Knoten: 260.000

Für die Querbeschleunigung sind, mit dem in Kapitel 6.7.1 folgenden Lastsetup und der gegebenen Elementanzahl, ca. 230 Iterationsschritte notwendig, um ein konvergierendes Ergebnis zu erhalten.

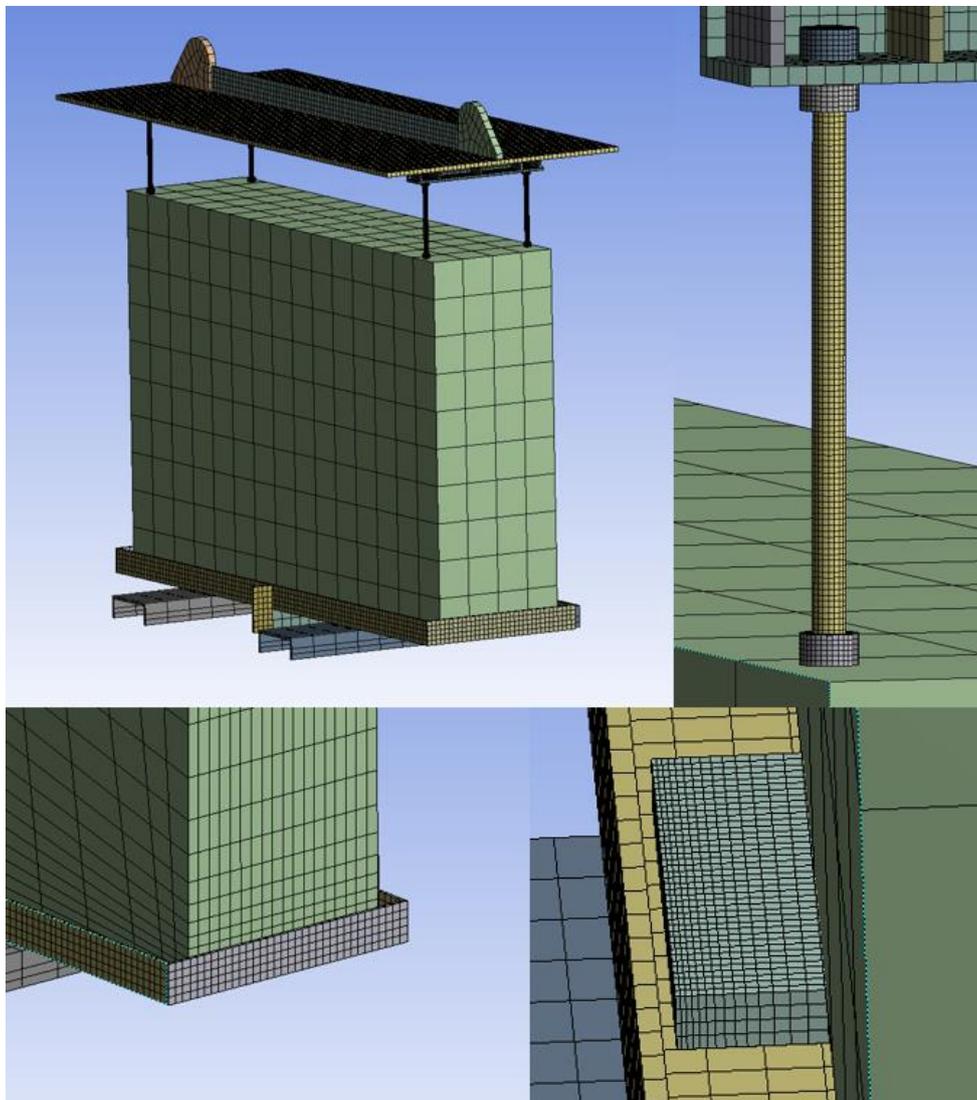


Abbildung 33: Vernetzung des Aktivteil. Rechts oben: Jochzugbolzen. Links unten: Kontaktnetz für Längsbeschleunigung.

Rechts unten: Kontaktnetz für Querbeschleunigung.

6.5.2 Kessel

Bei der Vernetzung werden alle Bauteile, bei denen es möglich ist, zu einer gemeinsamen Topologie zusammengefasst. Das führt zu einer Verbindung der Knoten des Netzes zwischen den Bauteilen. Dadurch wird die Anzahl der Verbundkontakte deutlich reduziert und der Berechnungsaufwand sinkt. Zwar steigt dadurch die Zeit, die für die Vernetzung notwendig ist. Allerdings muss das Netz pro Versteifungskonzept nur einmal erstellt werden. Die einzelnen Lastfälle können anschließend mit demselben Netz berechnet werden.

Für die Bauteile der Bodenwanne und des Rahmens wird eine Hexaeder-Vernetzung gewählt. Die Hexaeder-Elemente bieten gegenüber der Tetraeder-Vernetzung Vorteile hinsichtlich Berechnungsgeschwindigkeit und Ergebnisqualität [18]. Die Elementgröße wird mit 8 mm vorgegeben. Das entspricht der Materialstärke der Bodenwanne und der Versteifungen. Die Versteifungen der Wellwände und die Schweißnaht werden mit Hexaedern einer Größe von 3,5 mm und 2,75 mm vernetzt. Die Wellwände werden aufgrund der komplexen Geometrie mit Tetraedern vernetzt. Die Größe wird auf 110 mm festgelegt. Im Vergleich zum restlichen Netz ist dieser Wert sehr groß und führt zu einer Überschätzung der Steifigkeit der Wellwände. Diese Begrenzung ist allerdings aus Performancegründen der Hardware unumgänglich. Daraus ergeben sich in Summe folgende Eckdaten für das Netz:

- Anzahl der Elemente: 380.000 – 420.000
- Anzahl der Knoten: 1.600.000 – 1.800.000

Die Berechnung benötigt unter diesen Voraussetzungen ca. 12-15 Iterationsschritte, um zu konvergieren. Eine weitere Verfeinerung des Netzes ist deshalb, im Sinne der Berechnungszeit, nicht zweckmäßig. Für genauere Ergebnisse in den kritischen Bereichen wird auf eine Submodellanalyse zurückgegriffen. Dabei werden die Verschiebungen am Gesamtmodell mit einem groben Netz berechnet. Anschließend wird der kritische Bereich herausgetrennt und an den Schnittflächen mit den zuvor berechneten Verschiebungen beaufschlagt. Diese Methode macht es möglich kritische Bereiche mit einem deutlich feineren Netz zu berechnen. Des Weiteren kann auch die Geometrie detaillierter gestaltet werden, solange sich dadurch die Gesamtsteifigkeit nicht ändert [18]. In Abbildung 34 ist die Vernetzung des Kessels zwischen Bodenwanne und Wellwand ersichtlich. Die Wellwandversteifung und die Schweißnaht wurden feiner vernetzt als der Rest, da diese Bereiche aufgrund der Schadensfälle von besonderem Interesse sind.

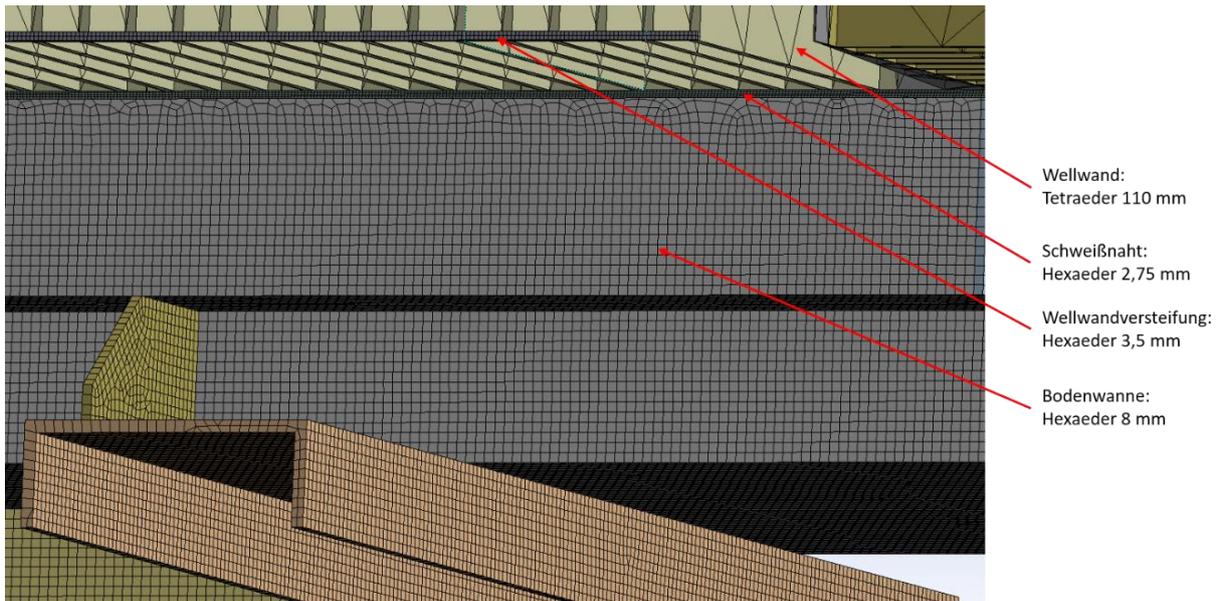


Abbildung 34: Vernetzung am Kessel

6.5.3 Submodelle

Alle Submodelle werden entsprechend den folgenden Vorgaben vernetzt und detailliert. Im Einflussbereich der größten Spannungen zwischen Wellwand und Bodenwanne wird das Netz auf 0,8 mm verfeinert. Des Weiteren wird der Übergangsbereich zwischen Wellwandfinne und Schweißnaht mit 1 mm großen Radien modelliert. Das liefert ein glatteres Spannungsbild, da die scharfen Kanten und Ecken sonst ideale Kerben darstellen. In Abbildung 35 ist die Vernetzung des Submodells exemplarisch dargestellt.

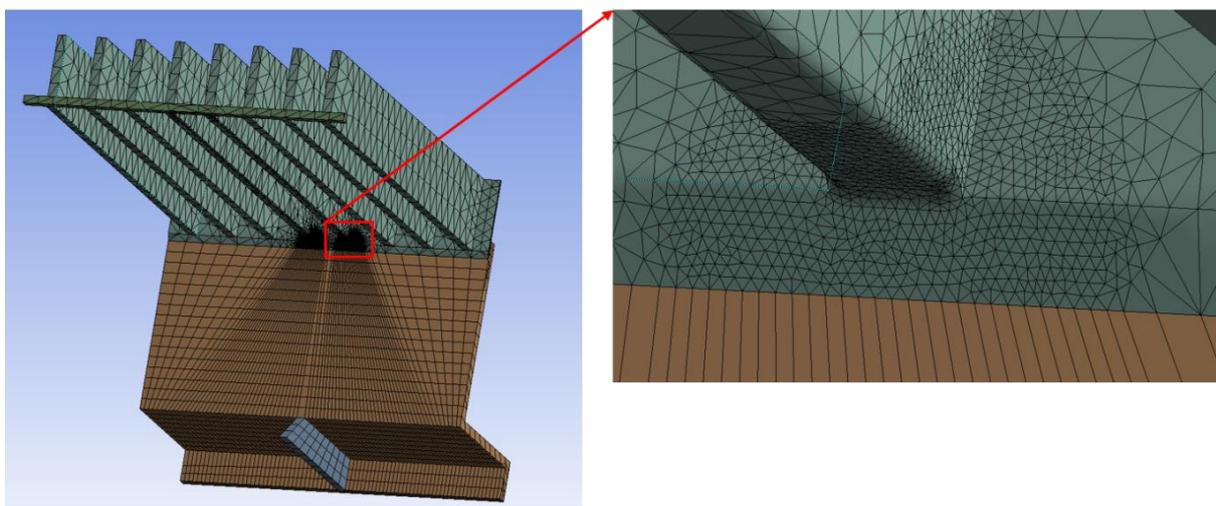


Abbildung 35: Vernetzung des Submodells

6.6 Lastannahmen und Reaktionskräfte

6.6.1 Lastannahmen am Kessel

In diesem Kapitel werden die notwendigen Lastannahmen für die nachfolgenden FEM-Berechnungen erläutert. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren werden alle Bauteile, die nicht für die Berechnung oder die Lasteinleitung notwendig sind, entfernt und durch Reaktionskräfte ersetzt. Besondere Aufmerksamkeit wird der Isolierflüssigkeit und dem Aktivteil gewidmet. Diese beiden Komponenten repräsentieren einen Großteil der Masse des Transformators. Die Isolierflüssigkeit wird in weiterer Folge durch hydrostatische Drücke auf den relevanten Innenflächen berücksichtigt. Die Reaktionskräfte des Aktivteiles werden mit Hilfe FEM-Berechnung bestimmt. Der Aktivteil ist über vier M20 Bolzen mit dem Deckel verbunden und in der Bodenwanne in Quer- und Längsrichtung nicht spielfrei geführt. Aufgrund dieser Voraussetzungen treten unter Quer- und Längsbeschleunigung nichtlineare Effekte am Aktivteil auf. Das führt zu Reaktionskräften auf den Kesseldeckel, die am einfachsten mit einer FEM-Berechnung bestimmt werden können.

Es werden drei verschiedene statische Lastfälle angenommen. Als Lastfälle werden die gemäß IEC 60076-1 für Transportauslegung geforderten Werte verwendet. In Tabelle 9 sind die verwendeten Lastfälle getrennt dargestellt. Wobei die x-Achse in Längsrichtung des Transformators verläuft, die y-Achse in Querrichtung und die z-Achse in vertikaler Richtung.

Tabelle 9: Lastfälle gemäß IEC 60076-1.

Lastfall	x-Achse (längs)	y-Achse (quer)	z-Achse (vertikal)
SLC 1	+/- 1 g		
SLC 2		+/- 1 g	
SLC 3			- 2 g (nach unten)

In Abbildung 36 und Abbildung 37 sind die Lastannahmen für die Querbeschleunigung schematisch dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung sind die Lasten aufgrund der Isolierflüssigkeit und die äußeren Lasten in getrennten Abbildungen dargestellt. Für die spätere FEM-Berechnung werden sämtliche Lasten gleichzeitig aufgebracht. Für die Dichte der Isolierflüssigkeit wird ein Wert von 880 kg/m^3 verwendet [19]. Es handelt sich dabei um eine Standardisolierflüssigkeit auf Mineralölbasis. Die Isolierflüssigkeit wird einmal als hydrostatischer Druck in Richtung der Erdbeschleunigung berücksichtigt. Das Nulldruckniveau wird dabei 150 mm über der Deckelunterkante angenommen, um die Füllhöhe

im Füllstandsrohr zu berücksichtigen. Die Querbeschleunigung der Isolierflüssigkeit wird ebenfalls durch einen hydrostatischen Druck berücksichtigt, allerdings in horizontaler Richtung. Das Nullniveau liegt dabei am linken Rand der Wellwände. Die Kraft F_1 dient als Ersatzkraft für die Zurrurte, die beim Transport verwendet werden. Für die Gurtersatzkraft F_1 wird als Wert die halbe Tragfähigkeit des Zurrmittels angenommen. Das entspricht 10.000 N pro Gurt. Die Kraft wird für Längs- und für Querbeschleunigung jeweils auf die zwei in Beschleunigungsrichtung vorhandenen Zurrösen am Rahmen aufgebracht. Für die Querbeschleunigung werden die Kräfte über die längsseitig angebrachten Zurrösen eingeleitet, bei Längsbeschleunigung über die beiden stirnseitigen. Die aus der Masse der Stahlbauteile resultierenden Belastungen, werden über die jeweiligen Beschleunigungen berücksichtigt.

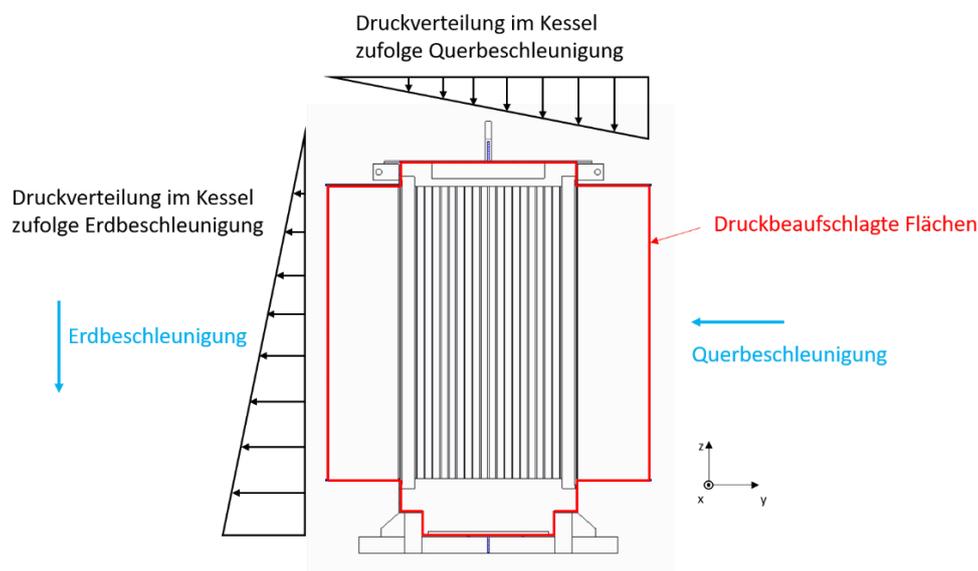


Abbildung 36: Innere Lastannahme am Kessel zur Berücksichtigung der Isolierflüssigkeit.

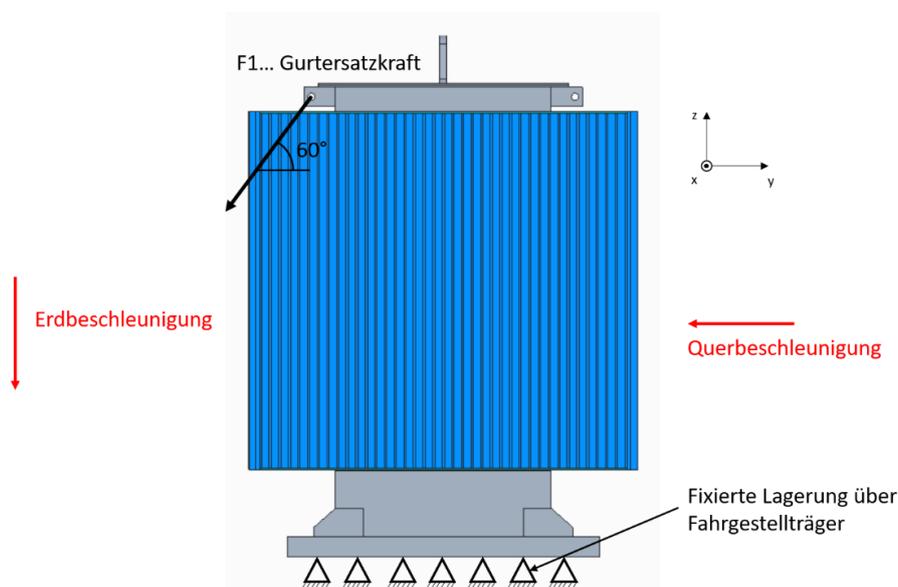


Abbildung 37: Äußere Lastannahme für Querbeschleunigung am Kessel.

Die Gewichtskraft des Aktivteils wird in Richtung der Erdbeschleunigung, auf die links in Abbildung 38 dargestellte Fläche, aufgebracht. Der Aktivteil ist nicht am Kesselboden fixiert. Deshalb werden die Reaktionskräfte des Aktivteil über die Jochzugbolzen an den Deckel übertragen. Diese Kräfte werden über den in Abbildung 38 dargestellten Hebewinkel eingeleitet.

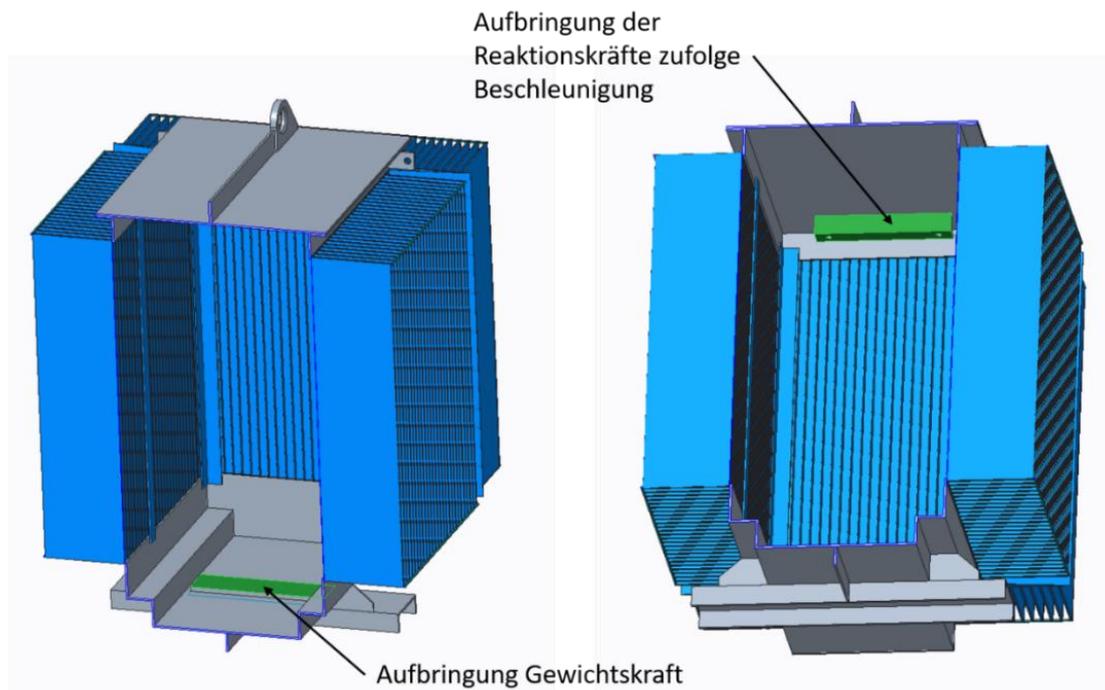


Abbildung 38: Lastaufbringung der Aktivteilkkräfte

Die weiteren Lastfälle folgen dem gleichen Schema. Mit dem Unterschied, dass die Querbeschleunigung zur Längs- beziehungsweise Vertikalbeschleunigung wird.

6.6.2 Reaktionskräfte auf den Kesseldeckel

Die Reaktionskräfte des Aktivteiles auf den Kesseldeckel können anhand einer FEM-Berechnung, an einem vereinfachten Aktivteilmodell, ermittelt werden. Dazu werden in diesem Kapitel das Ersatzmodell und die Lastannahmen beschrieben.

In Abbildung 39 ist das gewählte Ersatzmodell für die FEM-Berechnung dargestellt. Dafür wird dem Aktivteil eine Masse von 5.400 kg zugewiesen und eine Querbeschleunigung auf das System aufgebracht. Der Aktivteil selbst ist über die Jochzugbolzen mit dem Kesseldeckel verbunden. Die Höhe des Aktivteiles wird bei der Montage so eingestellt, dass der Aktivteil mit dem gesamten Gewicht in der Bodenwanne steht. Als Reibungskoeffizient wird $\mu = 0,2$ angenommen (siehe Kapitel 6.4). Der Aktivteil ist innerhalb der Bodenwanne nicht spielfrei geführt. Das Spiel beträgt umlaufend ca. 10 mm bis 15 mm. Das bedeutet der Aktivteil beginnt bei ausreichend großer Beschleunigung in der Bodenwanne

zu gleiten. Daraus entstehen zusätzliche Kräfte am Kesseldeckel. Die Kraft FG repräsentiert die Gewichtskraft des Aktivteiles. FB entspricht der durch die Beschleunigung hervorgerufenen Kraft.

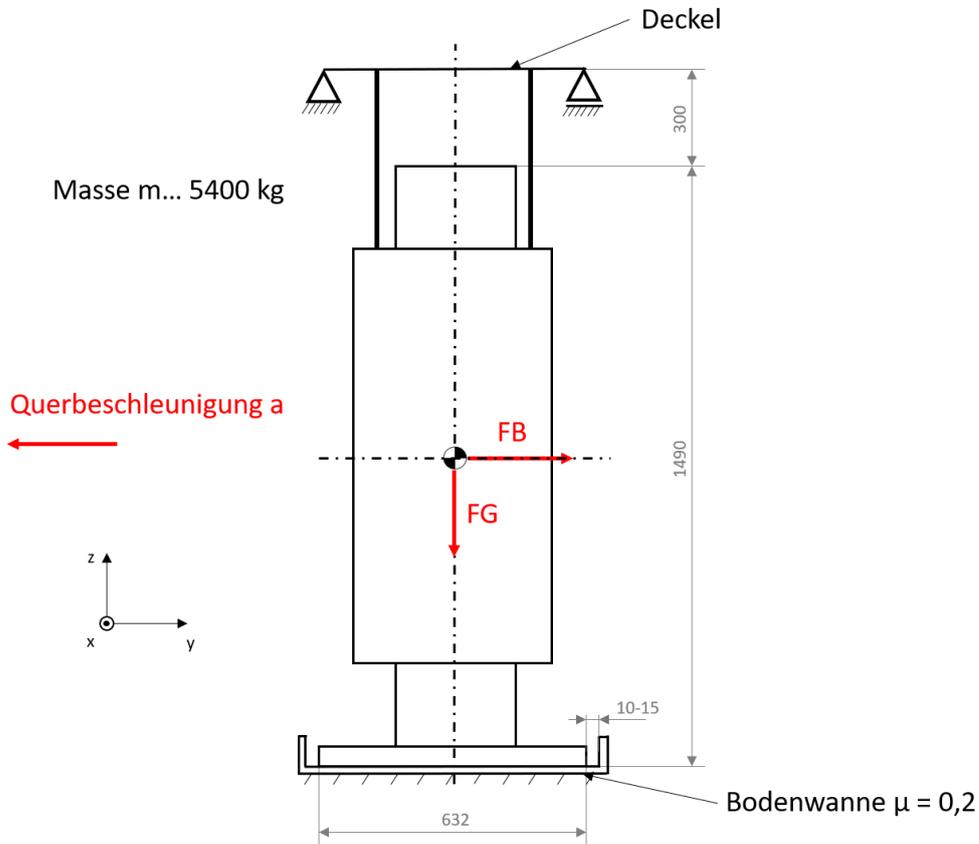


Abbildung 39: Ersatzmodell für die Berechnung der Reaktionskräfte des Aktivteiles auf den Kesseldeckel

Das Ersatzmodell für die Längsbeschleunigung ist analog zum beschriebenen Ersatzmodell aufgebaut.

6.7 Lastsetup in ANSYS

6.7.1 Aktivteil

In Abbildung 40 ist das Lastsetup für die Aktivteilberechnung unter Querschleunigung dargestellt. Der Deckel wird näherungsweise mit einer fixierten Lagerung in Position gehalten. Die Bodenwanne wird über die Fahrgestellträger fixiert gelagert. Als Lasten werden die Erdbeschleunigung und eine Beschleunigung in Querrichtung angesetzt. Bis auf den Aktivteil und den Jochzugbolzen wird allen Bauteilen S235 als Material zugeordnet. Dem Aktivteil werden die Eigenschaften von Stahl mit einer veränderten Dichte zugewiesen. Das ist notwendig damit der Aktivteil trotz der vereinfachten Geometrie die richtige Masse aufweist. Den Jochzugbolzen werden die mechanischen Eigenschaften der Schraubenfestigkeitsklasse 8.8 zugewiesen. Die Berechnung in Längsrichtung erfolgt analog und kann dem

Anhang 12.2 entnommen werden. Die Unterschiede liegen in der Beschleunigungsrichtung und der Kontaktsituation.

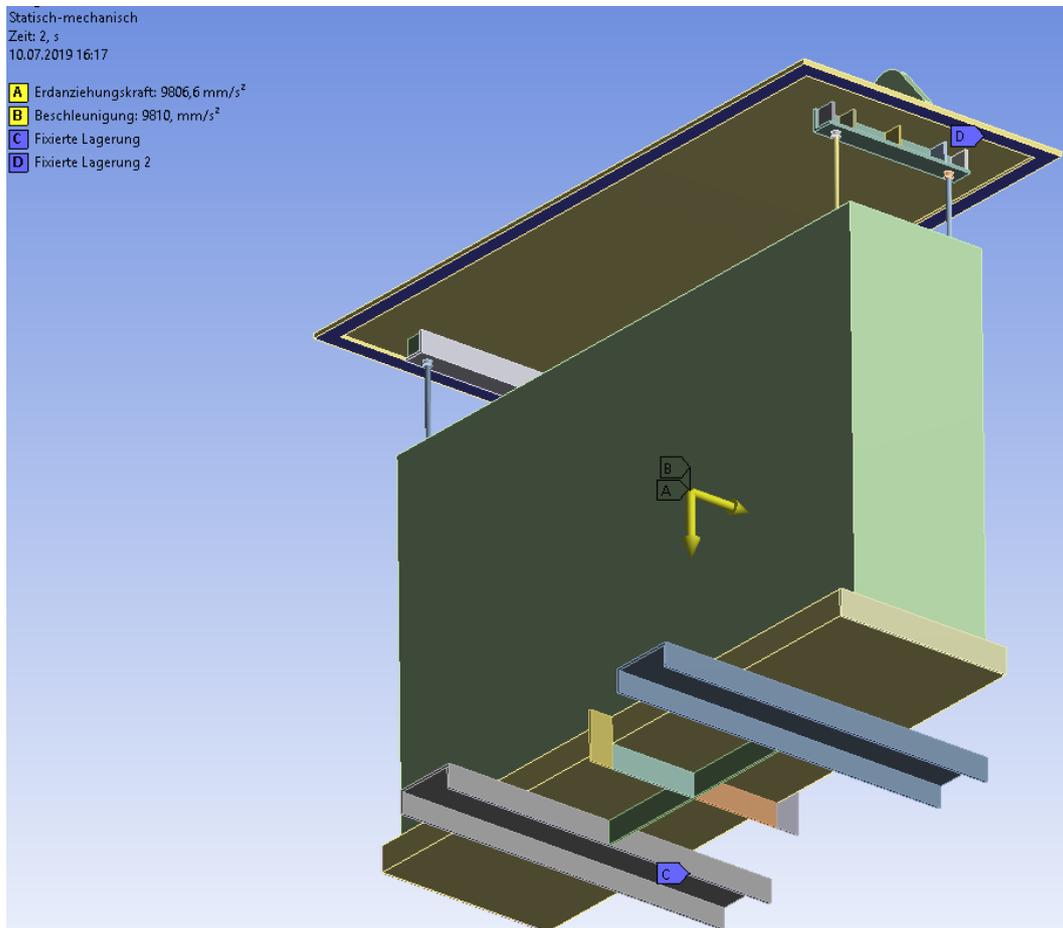


Abbildung 40: Lastsetup für die Aktivteilberechnung mit Querbeschleunigung.

6.7.2 Kessel

Es wird für alle drei Kesselvarianten je ein Lastfall für Quer-, Längs- und Vertikalbeschleunigung berechnet. In diesem Kapitel wird das Lastsetup für die Querbeschleunigung erläutert. Die Lastsetups für die anderen Lastfälle folgen dem gleichen Schema und können dem Anhang 12.2 entnommen werden.

In Abbildung 41 ist das Lastsetup für die Kesselberechnung unter Querbeschleunigung dargestellt. Die Lasten A und B entsprechen der Erdbeschleunigung und der Querbeschleunigung. Diese beiden Beschleunigungen haben allerdings nur Einfluss auf die massebehafteten Bauteile. Die Isolierflüssigkeit muss gesondert durch hydrostatische Drücke ersetzt werden. Der hydrostatische Druck zufolge der Erdbeschleunigung C und der hydrostatische Druck zufolge der Querbeschleunigung D werden getrennt voneinander berücksichtigt. Der maximale hydrostatische Druck beträgt jeweils:

- Durch Erdbeschleunigung: 0,1754 bar

- Durch Querbeschleunigung: 0,1397 bar

Diese beiden Drücke addieren sich bei der FEM-Berechnung zu dem tatsächlich unter Last herrschenden Druck. Die Kräfte E und F entsprechen den angenommenen Ersatzkräften von 10.000 N für die Zurrgurte. Die Kräfte G bis J sind die Reaktionskräfte des Aktivteils auf den Deckel. Diese werden mittels FEM-Berechnung aus dem Aktivteilmodell ermittelt. Der gesamte Kessel wird für die FEM-Berechnungen näherungsweise über die Fahrgestellträger fixiert gelagert.

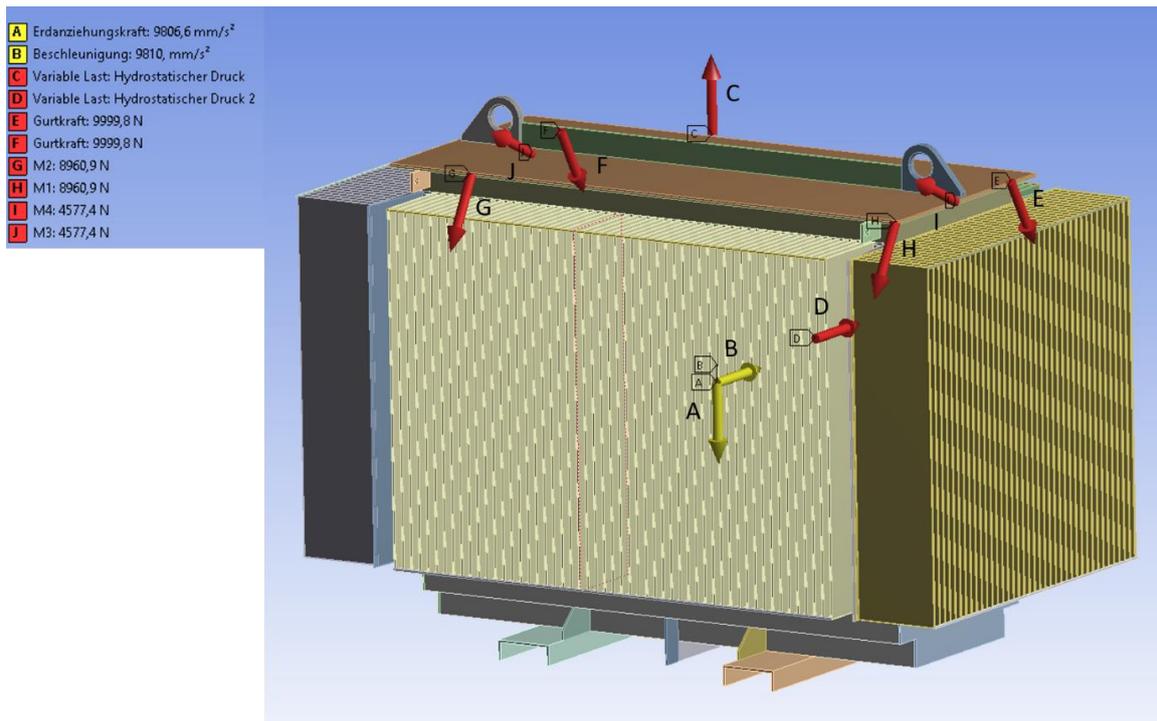


Abbildung 41: Lastsetup für Kesselberechnung mit Querbeschleunigung

6.7.3 Submodelle

In ANSYS können die Verschiebungen aus dem Gesamtmodell in ein Submodell importiert werden. Dafür wird die Geometrie des Gesamtmodells dupliziert und anschließend der kritische Bereich herausgeschnitten. Danach wird eine eigene strukturmechanische Analyse für das Submodell angelegt. Die Ergebnisse des Gesamtmodells können als Verschiebungsrandbedingungen in das Submodell importiert werden. Wie in Abbildung 42 dargestellt werden die Verschiebungsrandbedingungen an den Schnittflächen des Submodells aufgebracht. Man sieht, dass die Verschiebungen im Bereich der Wellwände deutlich größer sind als im unteren Bereich der Bodenwanne. Diese Differenz der Verschiebungen erzeugt die Spannungen in der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne. Durch die Submodelltechnik kann feinerer vernetzt werden. Das führt zu genaueren Spannungsergebnissen in den kritischen Bereichen.

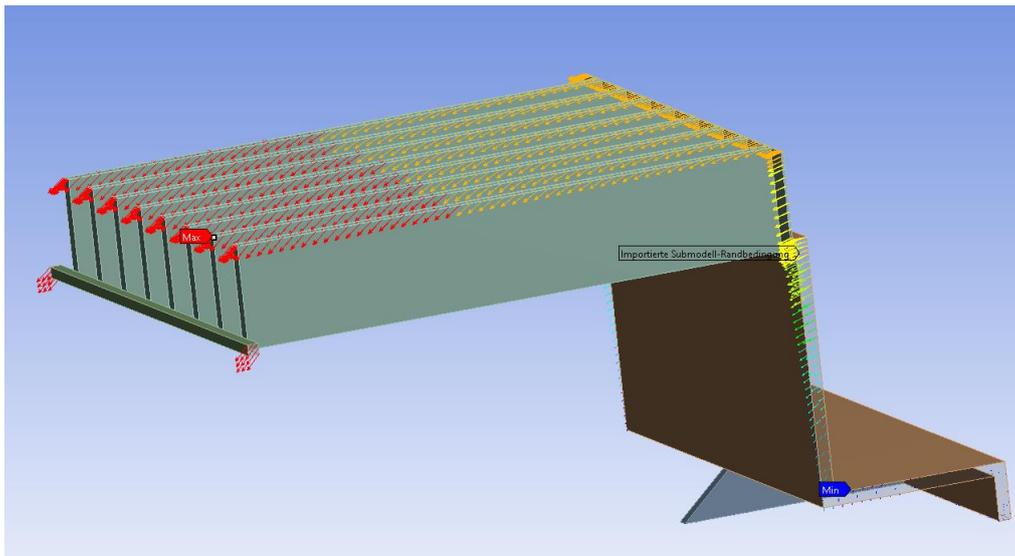


Abbildung 42: Submodellrandbedingungen

6.8 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der FEM-Berechnungen an Aktivteil und Kessel ausgewertet und diskutiert. Die Spannungen werden für alle Fälle anhand der von Mises Vergleichsspannungen untersucht. Beim Aktivteil werden neben den Spannungen in den Jochzugbolzen auch die Kraftreaktionen an der Befestigung zum Deckel ausgewertet. Eine genaue Auswertung der Spannungen erfolgt für den Kessel nur anhand der Submodelle.

6.8.1 Aktivteil

Die maximale Verschiebung beträgt 10,77 mm im oberen Bereich des Aktivteils und entspricht damit in etwa dem Initialabstand zwischen den Kontaktpartnern (siehe Kapitel 6.4). Die Verschiebung findet hauptsächlich in Querrichtung statt. In Abbildung 43 ist das Verschiebungsbild des Aktivteiles bei Querbeschleunigung dargestellt.

In Abbildung 44 wird die Vergleichsspannung und die plastische Vergleichsdehnung am Jochzugbolzen gezeigt. Bereits bei 1 g Querbeschleunigung treten an den Jochzugbolzen plastische Verformungen auf. Die Spannungen liegen mit Werten von 660 N/mm² oberhalb der Streckgrenze von 640 N/mm².

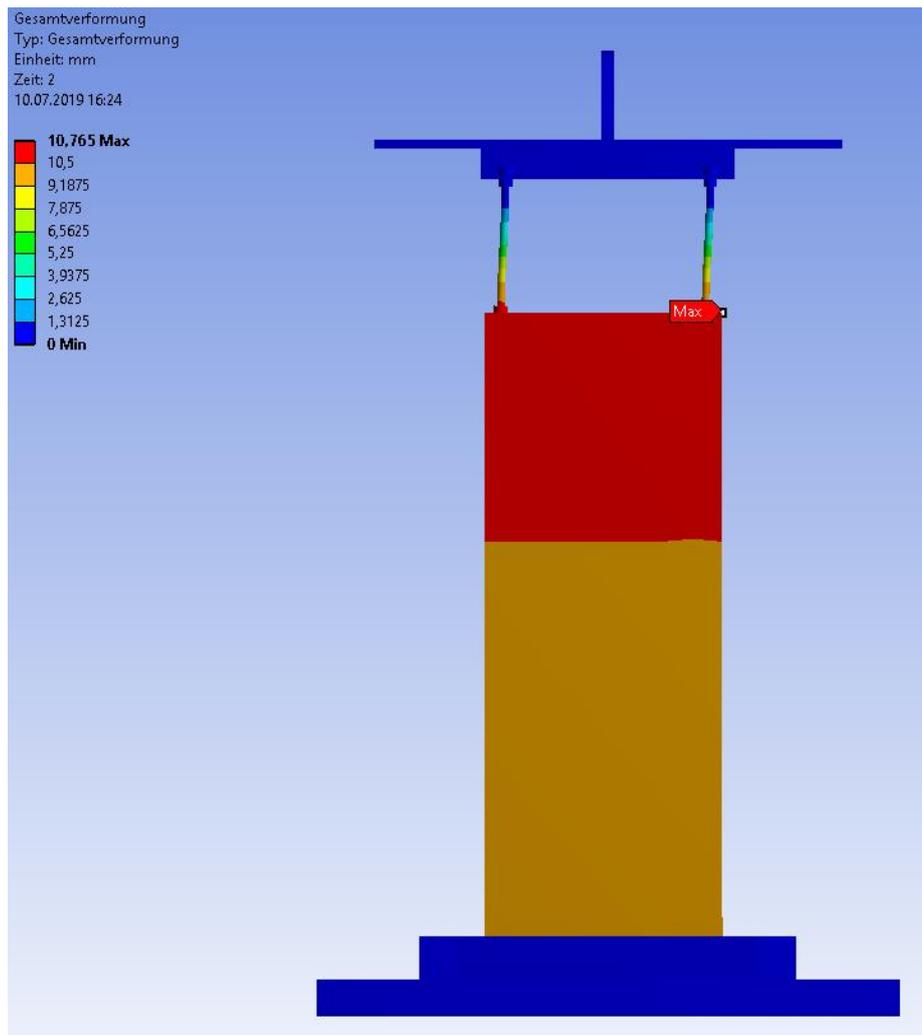


Abbildung 43: Gesamtverschiebung am Aktivteil bei Querbeschleunigung

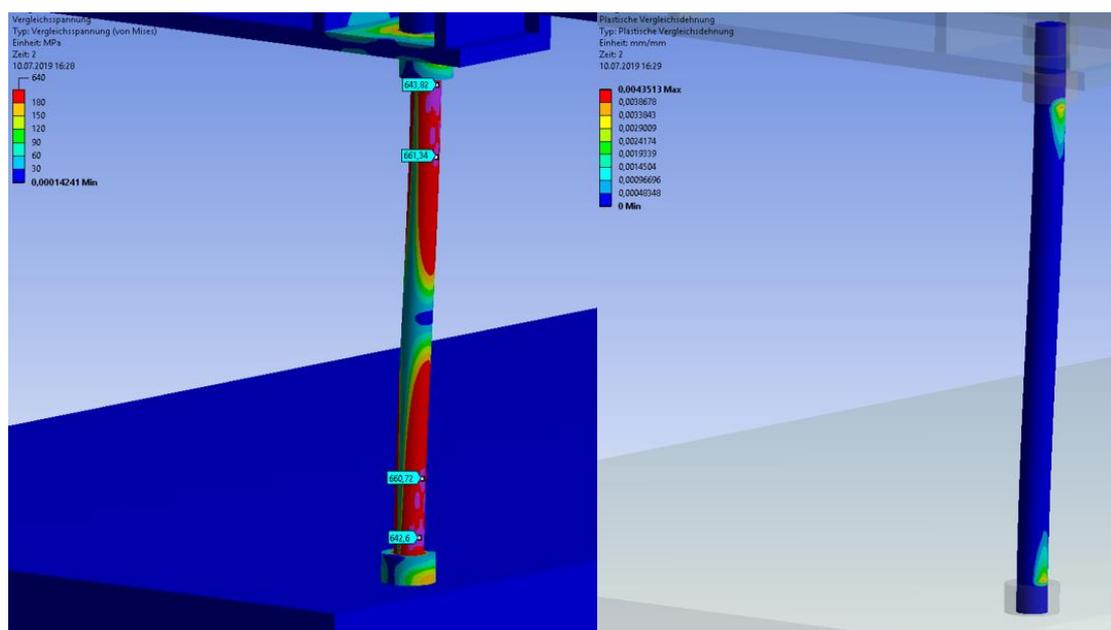


Abbildung 44: Links: Vergleichsspannung, rechts: plastische Vergleichsdehnung

Die Kraftreaktionen des Aktivteils auf den Deckel werden über die Kontaktflächen zwischen den Jochzugbolzenmuttern und den Hebewinkeln berechnet. Es gibt in ANSYS Workbench eine Funktion zur Berechnung von Kraftreaktionen auf Kontaktflächen. Die Muttern sind vereinfacht als Ring modelliert und über einen Verbundkontakt mit dem Hebewinkel verbunden. Es wird für die Kontaktfläche unter jeder Mutter eine Kraftreaktion berechnet. Daraus ergeben sich zwei Kraftreaktionen pro Jochzugbolzen. Diese werden anschließend zu einer Kraftreaktion pro Jochzugbolzen aufsummiert. Aufgrund der Symmetrie des Aktivteiles sind die Reaktionskräfte an jeweils zwei Jochzugbolzen gleich groß. Daraus ergeben sich für positive Quer- und Längsbeschleunigung die Werte in Tabelle 10. Die Kräfte M1 bis M4 entsprechen jeweils einem der vier Jochzugbolzen. Diese Kräfte werden in weiterer Folge für die Kesselberechnung verwendet.

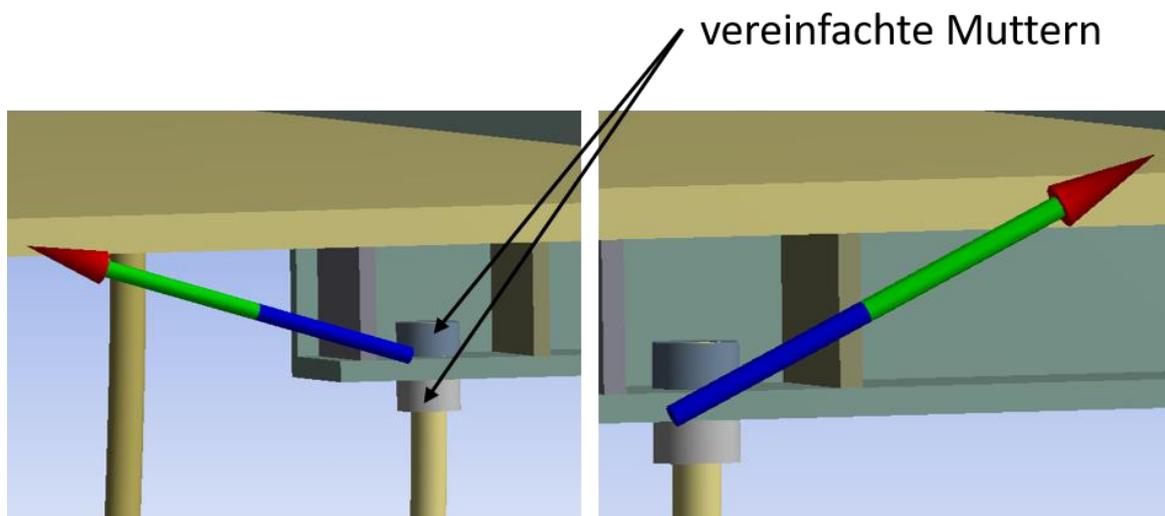


Abbildung 45: Kraftreaktionen der einzelnen Muttern. Links: obere Mutter. Rechts: untere Mutter.

Tabelle 10: Kraftreaktionen am Deckel durch den Aktivteil.

Querbeschleunigung	Kraft in y-Richtung [N]	Kraft in z-Richtung [N]	Längsbeschleunigung	Kraft in x-Richtung [N]	Kraft in z-Richtung [N]
M1	-4507	7745	M1	-4109	4221
M2	-4507	7745	M2	-3886	4946
M3	-4111	-2013	M3	-3886	4946
M4	-4111	-2013	M4	-4109	4221

6.8.2 Kessel

Im ersten Schritt werden die Gesamtverformungen an den verschiedenen Kesselvarianten verglichen. In Abbildung 46 ist zu sehen, dass die maximale Verformung bei allen Kesselversionen im selben Bereich, an der Position V1, auftritt. Auch das allgemeine Verformungsbild sieht bei allen drei Versionen in etwa gleich aus. Ein großer Unterschied ist allerdings bei den Absolutwerten zu beobachten. In Tabelle 11 sind die Werte der verschiedenen Kesselvarianten gegenübergestellt. Diese Werte ergeben sich aus der Summe der Verformungen in allen drei Raumachsen. Der Hauptanteil der Verformungen tritt für diesen Lastfall allerdings in Querrichtung auf. Zwischen den Varianten mit Blechgurt und Formrohrgurt ist der Unterschied bei den Verformungen relativ klein. Im Vergleich zur Version ohne Gurt weisen allerdings beide deutlich geringere Verformungen auf. Insbesondere die Verformung im Bereich der Schweißnaht (Position V3) zwischen Bodenwanne und Wellwand ist deutlich geringer.

Tabelle 11: Verformungswerte der verschiedenen Kesselversionen.

Kesselvariante	Position V1 [mm]	Position V2 [mm]	Position V3 [mm]
Ohne Gurt	9,97 (100 %)	3,51 (100 %)	2,70 (100 %)
Mit Blechgurt	7,33 (73,5 %)	1,74 (49,6 %)	0,71 (26,3 %)
Mit Formrohrgurt	7,32 (73,4 %)	1,72 (49,0 %)	0,66 (24,4 %)

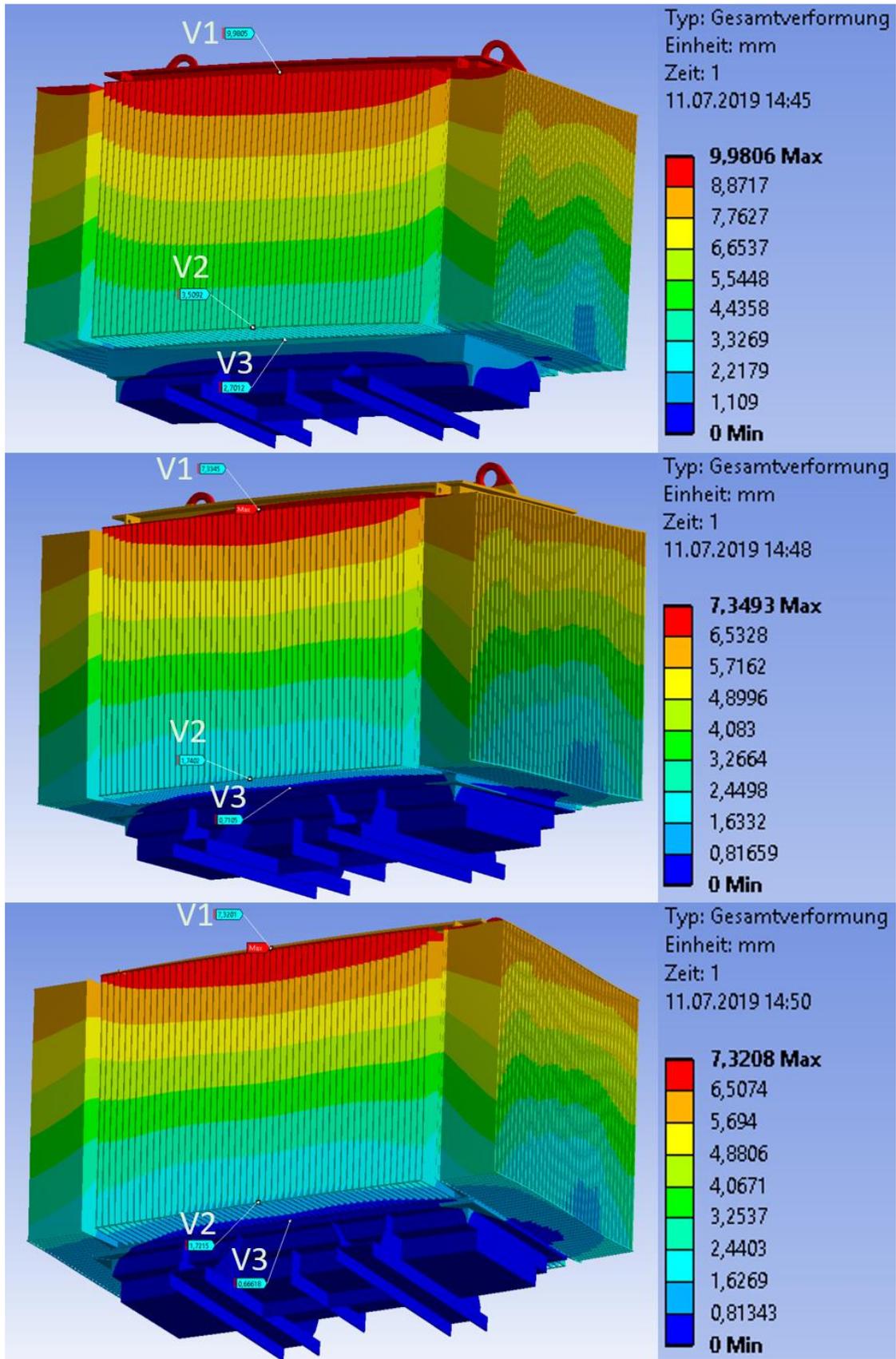


Abbildung 46: Gesamtverformung am Kessel mit den verschiedenen Versteifungskonzepten. Von oben nach unten: ohne Gurt, mit Blechgurt, mit Formrohrgurt.

Da bei der Kesselvariante ohne Gurt die höchsten Spannungen zu erwarten sind, werden die kritischen Bereiche für die Submodelle an diesem Modell definiert. Die Evaluierung der Kesselvariante ohne Gurt ergibt die in Abbildung 47 dargestellten kritischen Bereiche A bis D. Für die Bereiche A, B und D werden Submodelle erstellt und berechnet. Für Bereich C wird ein Submodell nur benötigt, wenn die Spannungen im Bereich D zu hoch sind. Der Grund dafür ist die geometrische Ähnlichkeit der Bereiche C und D. Danach werden die Spannungen in den kritischen Bereichen an mehreren Positionen ausgewertet. Die Ergebnisse der FEM-Berechnung werden anhand des Kesselmodells ohne Gurt erläutert und anschließend in Form eines Balkendiagramms mit den Ergebnissen der anderen Versteifungsvarianten verglichen.

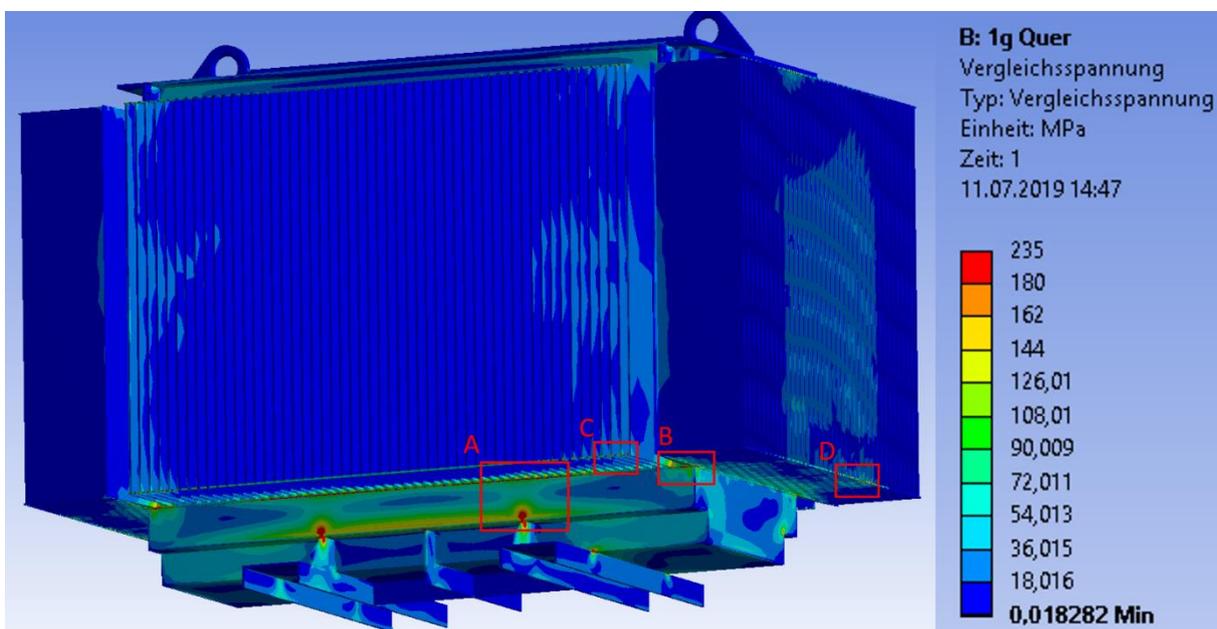


Abbildung 47: Kritische Bereiche der Kesselversion ohne Gurt.

Der kritische Bereich A weist sehr hohe Spannungen in der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne auf. Es kommt deshalb zu plastischen Verformungen im Bereich der Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand. Hohe Spannungen im Bereich der Streckgrenze treten auch im Bereich der Versteifung zwischen Bodenwanne und Fahrgestellträger auf. Im kritischen Bereich B treten die höchsten Spannungen ebenfalls im Bereich der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne auf. Im Bereich C und D treten hohe Spannungen in den Wellwandversteifungen auf.

In Abbildung 48 sind die Ergebnisse für das Submodell von Bereich A dargestellt. Die Farbskalierung der Spannungen ist für alle folgenden Submodelle gleich. Es ist erkennbar, dass die größten Spannungen genau am Übergang zwischen Wellwandfinne und Schweißnaht auftreten. Hier treten Spannungen deutlich oberhalb der Streckgrenze von DC01 auf. Der aus Zugversuchen ermittelte Wert liegt für DC01 bei circa 210 N/mm². Ein Überschreiten der Streckgrenze bedeutet, dass der Werkstoff sich in diesem

Bereich plastisch verformt. Der Wert 210 N/mm² gilt allerdings nur für den unbeeinflussten Grundwerkstoff.

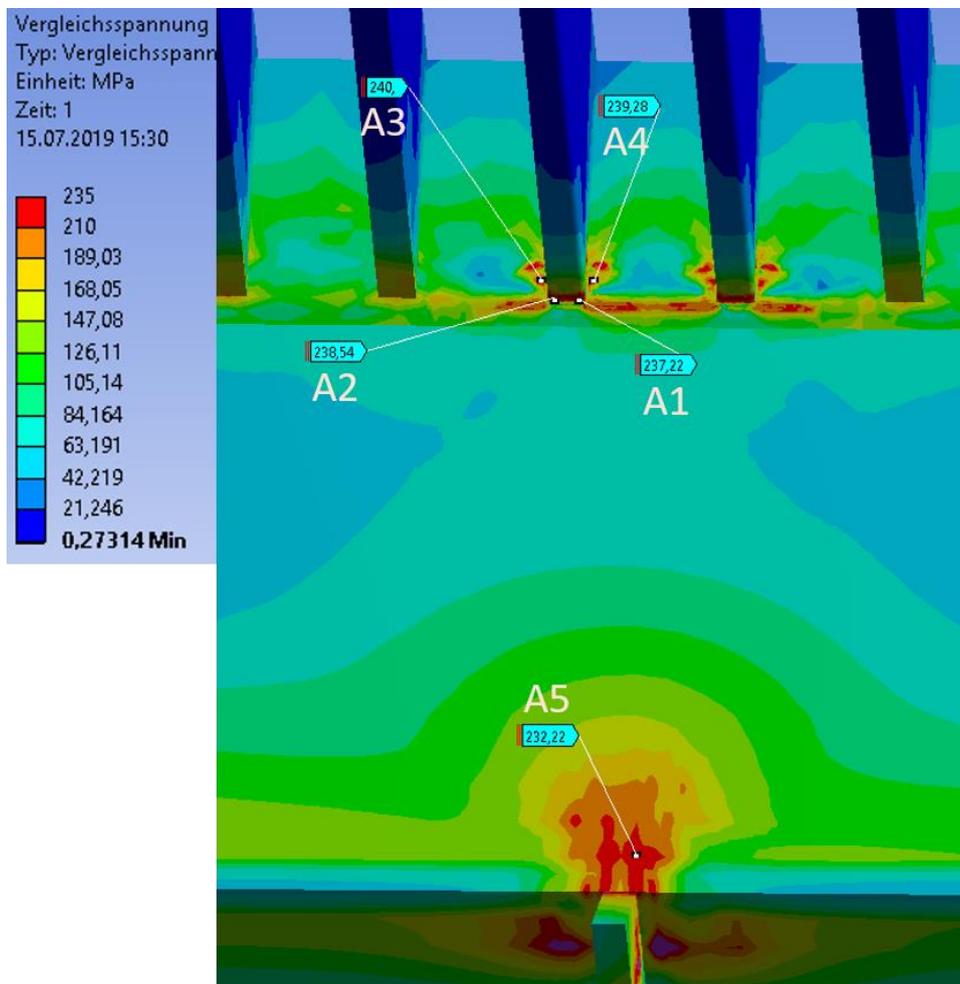


Abbildung 48: Vergleichsspannung am Submodell im Bereich A

Abbildung 49 zeigt die plastische Vergleichsdehnung. Es ist zu erkennen, dass plastische Verformungen hauptsächlich am Übergang zwischen den Wellwandfinnen und der Schweißnaht auftreten. Aus den Schadensanalysen und den metallografischen Untersuchungen ist bekannt, dass es sich bei diesem Bereich um eine Schwachstelle handelt. Durch Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht können die Spannungen in diesem Bereich noch ansteigen. Das führt zu erhöhter lokaler plastischer Verformung und das kann wiederum ein Wachstum von Mikrorissen und Unregelmäßigkeiten verursachen. Voraussetzung dafür ist eine zyklische Belastung. Derartige Belastungen treten hauptsächlich beim Transport des Transformator auf. Besonders viele Lastwechsel können beim Schiffstransport unter Schlechtwetterbedingungen auftreten.

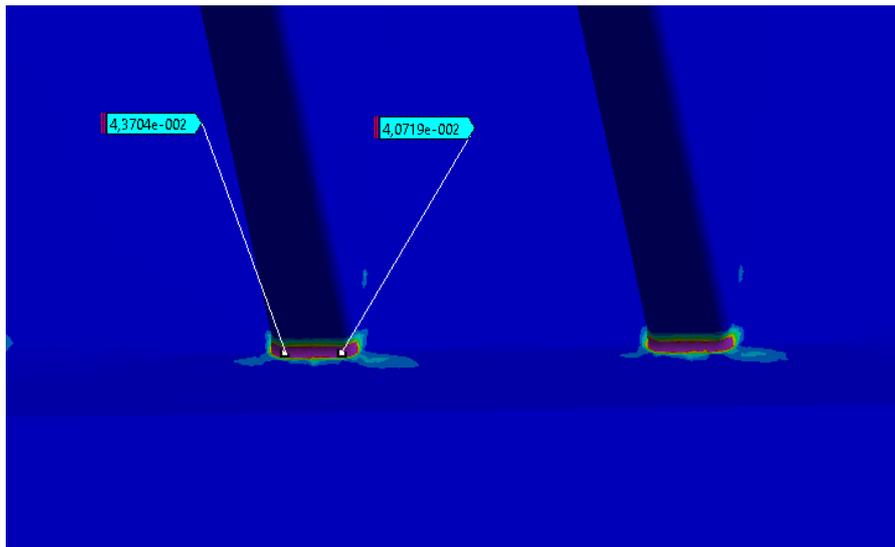


Abbildung 49: Plastische Vergleichsdehnung am Submodell im Bereich A [mm/mm]

In Abbildung 50 ist die Vergleichsspannung am Submodell für den Bereich B dargestellt. Die höchsten Spannungen liegen hier ebenfalls am Übergang zwischen den Wellwandfinnen und der Schweißnaht. Ein weiteres kritisches Element in diesem Bereich ist die Eckwelle. Der Vorteil im Bereich der Eckwelle ist, die dickere Ausführung des Anschlussbleches zur Bodenwanne. Dadurch steht in diesem Bereich im Vergleich zu den Wellwandfinnen mehr Material zur Verfügung das sich plastisch verformen kann.

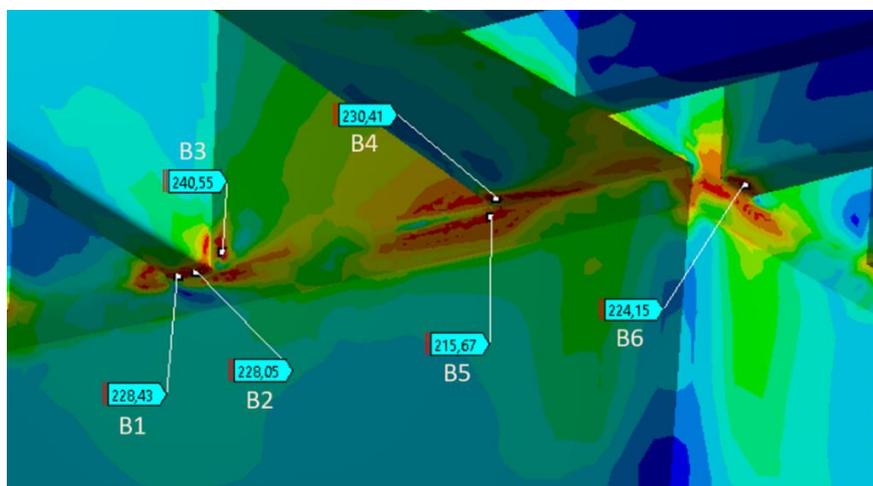


Abbildung 50: Vergleichsspannung am Submodell im Bereich B

Um die Auswirkung der zusätzlichen Beschleunigungen durch den Transport auf die Spannungen sichtbar zu machen, werden die FEM-Berechnungen unter alleiniger Einwirkung der Erdbeschleunigung wiederholt. In Abbildung 51 sind die Ergebnisse dieser Berechnung dargestellt. Es fällt auf, dass die Spannungen im Bereich des Schweißnahtübergangs ebenfalls über der Streckgrenze des Werkstoffes DC01 liegen. Allerdings sind die Spannungen im umliegenden Bereich deutlich geringer. Das bedeutet,

die Spannungen bei höheren Belastungen werden hauptsächlich durch plastische Verformung umgelagert.

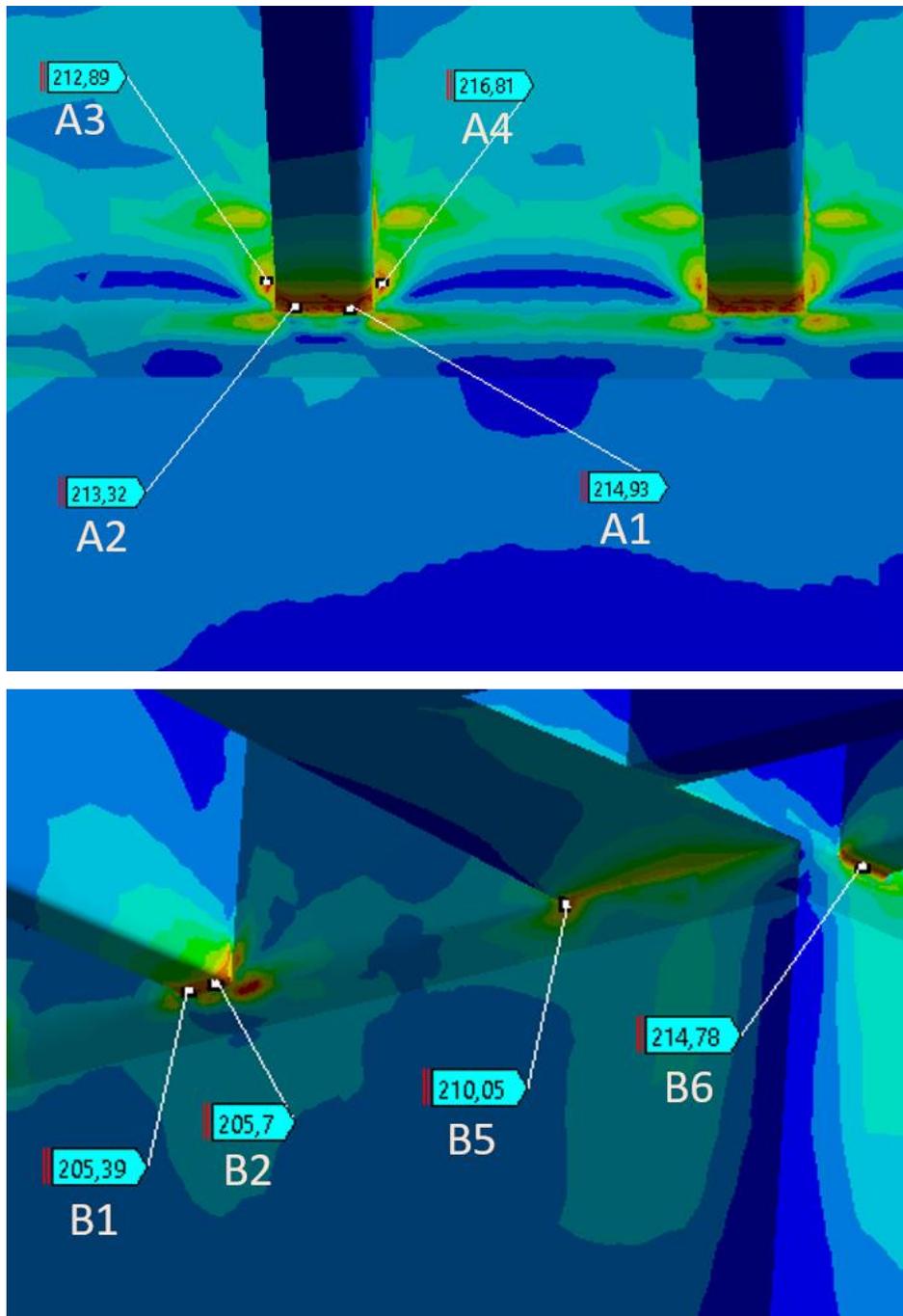


Abbildung 51: Vergleichsspannung unter alleiniger Einwirkung der Erdbeschleunigung. Oben: Bereich A. Unten: Bereich B.

Im Submodell des Bereiches D mit einer einheitlichen Elementgröße von 3 mm zeigt sich, dass die Spannungen für den statischen Lastfall nicht kritisch sind. Abbildung 52 zeigt die Spannungsverteilung am Submodell im Bereich D. Aufgrund der niedrigen Spannungen in diesem Bereich werden die Wellwandversteifungen nicht weiter untersucht.

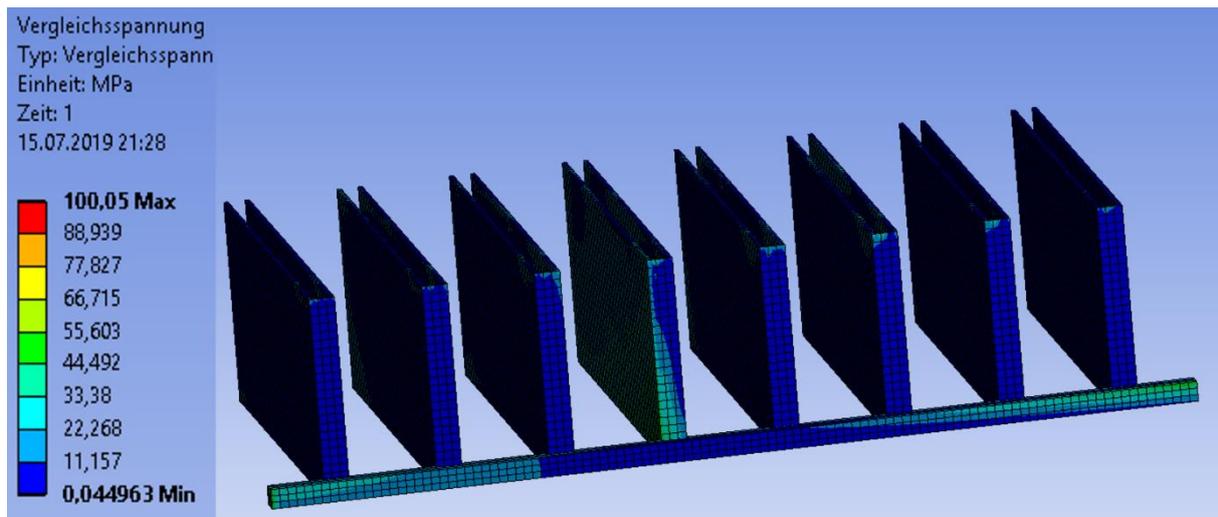
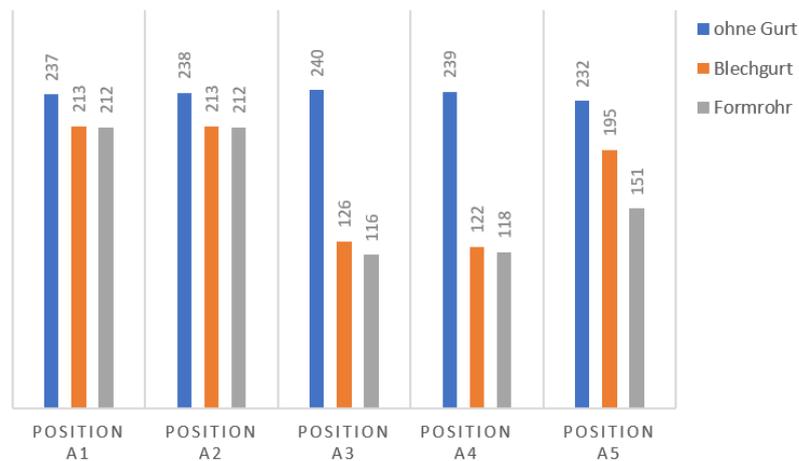


Abbildung 52: Vergleichsspannung am Submodell für Bereich D

Die Vergleichsspannungen der Bereiche A und B werden für alle drei Kesselvarianten an den gleichen Positionen ausgewertet und gegenübergestellt. In den Diagrammen in Abbildung 53 sind die Vergleichsspannungen an den jeweiligen Positionen dargestellt. Für den Bereich A ist ersichtlich, dass die Spannungen durch die zusätzlichen Versteifungen sinken. Allerdings liegen die Spannungen an den Positionen A1 und A2 auch bei den versteiften Versionen noch oberhalb der Streckgrenze des Werkstoffes. An den Positionen A3, A4 und A5 ist eine deutliche Spannungsreduktion zu beobachten. Die Spannungen an diesen Positionen können durch die zusätzlichen Versteifungen auf ein Niveau unterhalb der Streckgrenze gesenkt werden. Wobei an der Position A5 die Variante mit Formrohr noch erheblich besser abschneidet als die Variante mit Blechgurt. Für den Bereich B ergibt sich an den Positionen B1 und B2 ebenfalls eine geringfügige Reduktion der Spannungen. Diese liegen aber nach wie vor oberhalb der Streckgrenze des Werkstoffes. An der Position B3 reduziert sich die Spannung, analog zu Bereich A, ebenfalls stark und liegt für die Versionen mit Blechgurt und Formrohr deutlich unterhalb der Streckgrenze. Für die Positionen B4 bis B6 liegen die Spannungen oberhalb der Streckgrenze und zeigen durch die zusätzlichen Versteifungen keinerlei Spannungsreduktion.

VERGLEICHSSPANNUNGEN BEREICH A



VERGLEICHSSPANNUNGEN BEREICH B

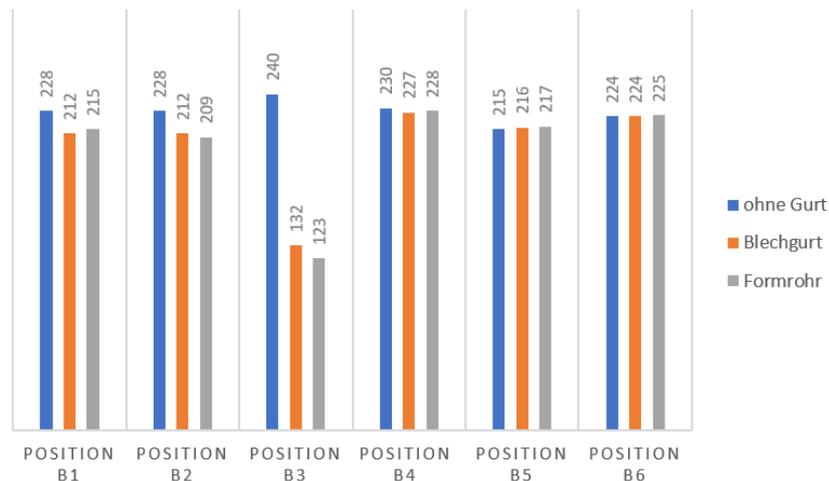


Abbildung 53: Vergleichsspannungen für die Bereiche A und B

Das bedeutet im Bereich A liegen die Spannungen an den Positionen A1 und A2 auch mit den zusätzlichen Versteifungen oberhalb der Streckgrenze. Für den Bereich B trifft das auf alle Positionen außer Position B3 zu. Diese kritischen Positionen liegen alle im Bereich des Übergangs zwischen Wellwandfinne und Schweißnaht. Das sind genau jene Stellen, an denen bereits Risse aufgetreten sind.

Die Spannungen übersteigen somit die Streckgrenze in vielen Bereichen der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne. Bisher kam es trotz der hohen Spannungen zu vergleichsweise wenigen Schäden an Transformatoren in dieser Leistungsklasse. Der Grund dafür liegt zum Teil in der Gutmütigkeit der Werkstoffe. Das hohe Fließvermögen des DC01 und des S235 ermöglichen einen Spannungsabbau durch Fließen über große Lastbereiche hinweg. Voraussetzung dafür ist allerdings eine einwandfreie Schweißnaht ohne Unregelmäßigkeiten, die unter dynamischer Lasteinwirkung wachsen können. Da sich allerdings die Schweißnaht bei den Schadensanalysen und den Schweißnahtuntersuchungen

als sehr anfällig für Unregelmäßigkeiten erwiesen hat, wird in weiterer Folge auf das Thema Ermüdungsfestigkeit eingegangen.

6.8.3 Ermüdungsfestigkeit

Wie bereits mehrfach erwähnt, können Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht unter zyklischer Belastung zu Rissen führen. Deshalb wird in diesem Kapitel eine Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit aufgrund der vorliegenden FEM-Ergebnisse durchgeführt.

In Abbildung 54 sind die Spannungen für den Lastfall mit 1 g Querbeschleunigung und die Spannungen für den Lastfall zufolge der Erdbeschleunigung dargestellt. Die Auswertung der Spannungen erfolgt in ca. 20 mm Abstand zur Kerbstelle im Bereich der Wellwandfinne, um näherungsweise die Nennspannungen zu erhalten. Daraus ergibt sich eine Oberspannung σ_{o1} und eine Unterspannung σ_{u1} . Aus diesen beiden Spannungen können eine Mittelspannung σ_m sowie eine Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ ermittelt werden:

- $\sigma_{o1} = 205 \text{ N/mm}^2$
- $\sigma_{u1} = 93 \text{ N/mm}^2$
- $\sigma_m = 149 \text{ N/mm}^2$
- $\Delta\sigma = 112 \text{ N/mm}^2$

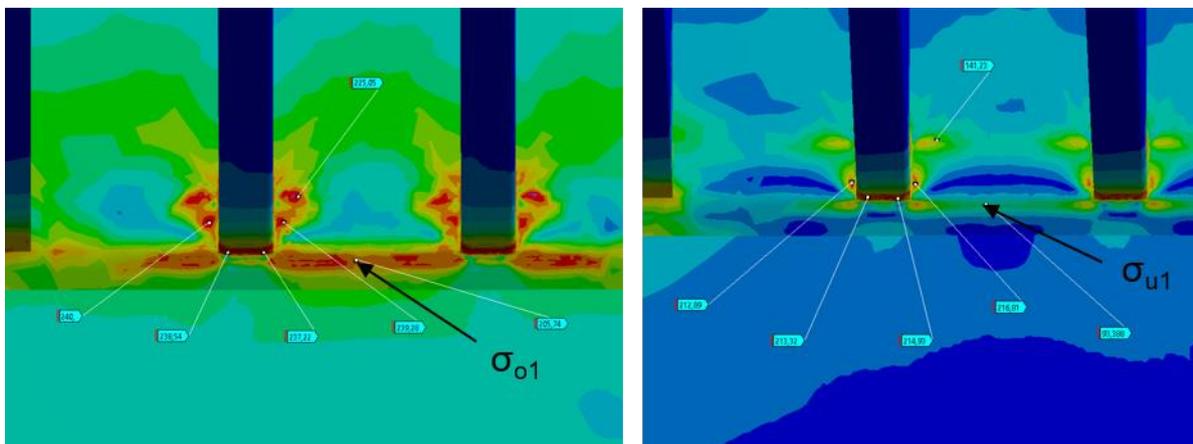


Abbildung 54: Nennspannungsauswertung an der Schweißnaht. Links: Lastfall 1 g Querbeschleunigung. Rechts: Lastfall nur Erdbeschleunigung.

Anschließend wird eine entsprechende Fatigue-Klasse (FAT-Klasse) ausgesucht, um die Ermüdungsfestigkeit der vorliegenden Schweißverbindung beurteilen zu können. Allerdings gibt es in den IIW-Empfehlungen keine exakt passende FAT-Klasse. Die FAT-Klasse 614 ist noch am ehesten mit der vorliegenden Schweißverbindung vergleichbar. Diese FAT-Klasse beschreibt eine Schweißverbindung am Überlappstoß mit zwei Kehlnähten. Die FAT-Klasse 614 ist eine der, bezüglich ihrer Dauerfestigkeit,

schwächsten FAT-Klassen. Bei einer Spannungsschwingbreite kleiner als 36 N/mm^2 kann für diese FAT-Klasse von dauerfestem Verhalten ausgegangen werden. Das setzt allerdings Schweißnähte der höchsten Güteklasse voraus [23]. Vergleicht man nun die FAT-Klasse 614 mit der tatsächlichen Schweißverbindung in Abbildung 55, sieht man, dass die zweite Kehlnaht fehlt. Des Weiteren verringert sich durch die Anwendung der mittleren Qualitätsstufe nach DIN EN ISO 5817 – C die Ermüdungsfestigkeit der Schweißverbindung weiter. Bezugnehmend auf die durchgeführten Schweißnahtuntersuchungen muss allerdings davon ausgegangen werden, dass diese Qualitätsstufe nicht eingehalten werden kann. Deshalb wird eine Verringerung der zulässigen Spannungsschwingbreite auf 27,7 % der FAT-Klasse 614 angenommen. Daraus ergibt sich eine theoretische Spannungsschwingbreite von 10 N/mm^2 für dauerfestes Verhalten.

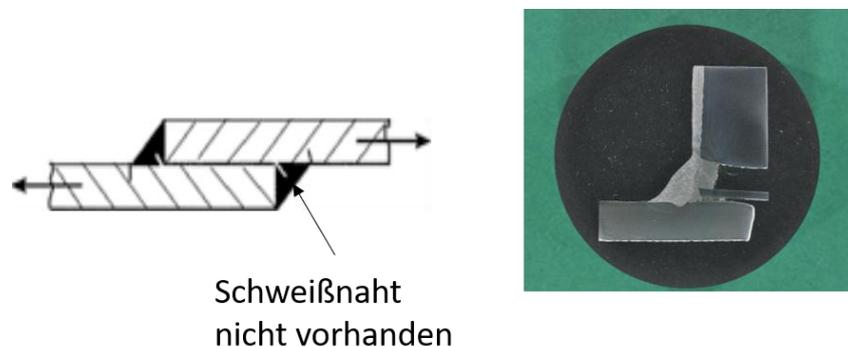


Abbildung 55: FAT-Klasse 614 im Vergleich zur tatsächlich vorhandenen Schweißnaht [23].

In Abbildung 56 sind die Wöhlerkurven verschiedener FAT-Klassen dargestellt. Der blaue Graph entspricht der FAT-Klasse 614. Der rote Graph stellt die verringerte Ermüdungsfestigkeit aufgrund der im obigen Absatz genannten Faktoren dar. Der Graph wird im unteren Bereich durch die Abszisse abgeschnitten. Aufgrund der verringerten Ermüdungsfestigkeit liegt nun die zuvor errechnete Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ im Bereich der Kurzzeitfestigkeit außerhalb der zulässigen Werte. Das bedeutet die Spannungen an der Schweißnaht befinden sich im statistischen Streufeld der Wöhlerversuche. Für den quasistatischen Fall stellt das kein Problem dar. Treten nun aber zyklische Belastungen während des Transportes auf, muss mit einem Versagen der Schweißnaht nach wenigen Lastzyklen gerechnet werden.

Zur genauen Ermittlung der Wöhlerkurve im vorliegenden Fall müssen Schwingversuche an Schweißnahtproben durchgeführt werden. Allerdings zeigt bereits die grobe Abschätzung, dass die Schweißverbindung für die zu erwartenden Belastungen nicht geeignet ist.

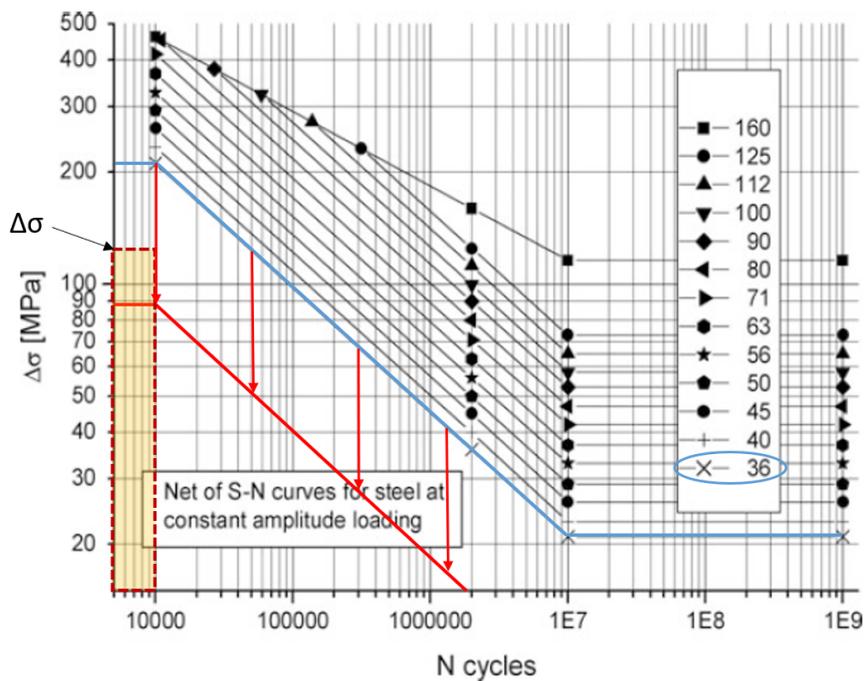


Abbildung 56: Wöhlerkurve mit FAT-Klassen. Blau: FAT-Klasse 614. Rot: Reduzierte FAT-Klasse 10 N/mm² für vorliegende Schweißnaht [23].

7 Technische Auswirkungen und Lösungsvorschläge

Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Schweißnaht zwischen den Wellwänden und der Bodenwanne eine Schwachstelle darstellt. Die Spannungen durch mechanische Belastungen nehmen in diesem Bereich bereits bei Transformatoren mit einer Leistung von 5 MVA Werte im Bereich der Streckgrenze an. Das ist vor allem auf die geringe Materialstärke und die ungünstige Geometrie der Wellwand im Vergleich zur Bodenwanne zurückzuführen. Die Wellwände werden vollautomatisch auf speziell dafür gebauten Maschinen gefertigt. Die Materialstärke ist deshalb auf 1,5 mm begrenzt. Derzeit werden Versuche durchgeführt, um die Materialstärke der Wellwände auf 2 mm zu steigern.

In erster Linie ist es deshalb wichtig, dass die Schweißnähte den qualitativen Anforderungen entsprechen. Bei einer mangelhaften Ausführung kann die Festigkeit der verwendeten Werkstoffe nicht voll ausgenutzt werden. Da die Stahlbauteile ausschließlich von Sublieferanten gefertigt werden, kann auf die Ausführungsqualität nur indirekt Einfluss genommen werden. Die Kessel werden ausschließlich lackiert angeliefert, deshalb ist es schwierig die Schweißnähte einer Sichtprüfung zu unterziehen. Als Maßnahme zur Qualitätssicherung sollte eine qualifizierte Schweißaufsichtsperson in regelmäßigen Abständen Audits beim Sublieferanten durchführen. Bei sehr großen Wellwandkesseln mit hohen Belastungen im Bereich der Schweißnähte kann eine Abnahme des Wellwandkessels beim Lieferanten erfolgen. Bei der Abnahme müssen alle kritischen Schweißnähte inspiziert und Unregelmäßigkeiten

dokumentiert und bewertet werden. Unzulässige Unregelmäßigkeiten müssen in weiterer Folge entsprechend beseitigt werden. Im Zuge der Abnahme erscheint es auch sinnvoll, die Dichtheitsprüfung des Wellwandkessels zu begleiten.

Wenn eine ausreichende Schweißnahtqualität sichergestellt ist, muss darauf geachtet werden, dass die Verformungen im Bereich der Schweißnaht begrenzt werden. Durch konstruktive Maßnahmen können so die Spannungen in der Schweißnaht reduziert werden. Ein weiteres großes Problem entsteht bei zyklischen Belastungen, da die Ermüdungsfestigkeit der vorliegenden Schweißnahtverbindung als äußerst gering einzuschätzen ist. Es ist hervorzuheben, dass der Wellwandkessel für Leistungen von 5 MVA ohne zusätzliche Maßnahmen bereits an seine Grenzen stößt. Es sollte festgelegt werden bis zu welcher Leistung der Wellwandkessel eingesetzt werden kann. Weitere wichtige Einflussgrößen sind die Gesamtmasse und die Höhe der Isolierflüssigkeitssäule im Transformator. Zusätzlich spielen auch die Transportdistanz und der Aufstellungsort eine Rolle. Je größer die zurückzulegende Strecke und je abgelegener der Einsatzort ist, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit für große mechanische Belastungen während des Transportes.

Der Aktivteil muss am Boden des Kessels fixiert werden, da dieser sonst aufgrund der Bewegungsmöglichkeit zusätzliche Kräfte auf den Kessel verursacht. Durch die Bewegung des Aktivteils im Inneren des Kessels kann es auch zu Beschädigungen an den Isolierungen kommen. Das kann insbesondere bei Transformatoren mit Laststufenschalter zu Problemen führen, da hier in Längsrichtung die Bewegung nicht durch die Bodenwanne begrenzt ist. Zur Fixierung des Aktivteiles kommen mehrere Möglichkeiten in Frage. Eine Möglichkeit ist es, den Aktivteil über aufgeschweißte Metallwinkel am Kesselboden zu fixieren.

Es werden schon seit einiger Zeit zu Testzwecken Transportdatenlogger an verschiedenen Transformatoren angebracht. Die Auswertung der Daten hat gezeigt, dass die Verwendung von Transportdatenloggern bei Transporten innerhalb der EU nicht zwingend notwendig ist. Die aufgezeichneten Stöße lagen in der Regel unterhalb der zulässigen Normwerte. Zurückzuführen ist das auf die strikten Vorschriften bei Fahrzeugwartung und die hohe Qualität der Fahrbahnen innerhalb der Europäischen Union. Des Weiteren werden die Transporte innerhalb der Europäischen Union meist mit Hilfe von LKW, ohne Umladen zwischen Werk und Aufstellungsort, durchgeführt. Daten von Transporten außerhalb der Europäischen Union zeigen meist deutlich höhere Werte als in den Normen angegeben. Allerdings gibt es bei diesen Daten noch große Unsicherheiten, da die Geräte bei den Tests oft nicht ordnungsgemäß ausgeschaltet und zurückgesendet wurden. In diesem Zusammenhang wird ein Prozess zur effizienten Verwendung von Transportdatenloggern erarbeitet. Dazu werden alle Kessel standard-

mäßig mit einem Flansch zur Anbringung des Transportdatenloggers versehen. Geplant ist alle Transformatoren, deren Einsatzort außerhalb der Europäischen Union liegt, mit einem Transportdatenlogger auszustatten. Innerhalb der Europäischen Union werden die Transportdatenlogger nur auf Kundenwunsch angebracht. Eine Sweep Frequency Response Analysis wird ausschließlich auf Kundenwunsch durchgeführt. Denn bei Anlieferung der Verteiltransformatoren ist in der Regel kein Prüftechniker mit dem notwendigen Equipment vor Ort, um die Diagnosemessungen durchzuführen.

8 Zusammenfassung

Durch die Neuausrichtung des Portfolios bei SIEMENS Transformers Weiz haben sich die Größen, Leistungen und Massen der produzierten Transformatoren deutlich erhöht. Das macht es notwendig die Konstruktionen hinsichtlich ihrer mechanischen Stabilität zu untersuchen. Die während der Lebensdauer des Transformators gestellten Anforderungen müssen erfüllt werden. Ein wesentlicher Punkt ist hier der Transport vom Werk zum Einsatzort. Während des Transportes treten verschiedene mechanische Belastungen auf, die im schlimmsten Fall zu einer Beschädigung des Transformators führen können. Deshalb beschäftigt sich diese Masterarbeit mit dem Thema Transportbelastungen und deren Auswirkungen auf die Stahlbauteile von Verteiltransformatoren. Das Hauptaugenmerk liegt auf Verteiltransformatoren mit Wellwandkessel. Der Wellwandkessel wurde ursprünglich für kleinere Verteiltransformatoren entwickelt und unterliegt deshalb einigen konstruktiven Grenzen. Da diese Ausführung aber in der Regel Kostenvorteile bietet, wird sie auch für immer größere Transformatoren angewendet.

Im ersten Schritt wurden die Grundlagen zum Thema Transportbelastungen und Verteiltransformatoren erarbeitet. Es gibt zwischen den verschiedenen Transportmitteln deutliche Unterschiede hinsichtlich der auftretenden Transportbelastungen. Auffällig ist auch, dass die verschiedenen Normenwerke oft voneinander abweichende Angaben zu den Transportbelastungen machen.

Zur zielgerichteten Abarbeitung dieser komplexen Thematik wurden im Vorfeld vier Arbeitspakete festgelegt.

1. Anfangs wurden Abweichungsberichte der letzten fünf Jahre auf Schäden untersucht, die in Zusammenhang mit dem Transport stehen oder stehen könnten. Das Ziel dieser Untersuchungen war es die Schwachstellen gegenüber von mechanischen Belastungen zu lokalisieren. Deshalb wurden in erster Linie Schäden, die nach der Auslieferung aufgetreten sind, untersucht. Es zeigte sich, dass die größte Schwachstelle im Bereich der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne liegt. Insbesondere im Bereich der einzelnen Wellwandfinnen. Dort sind in

der Vergangenheit wiederholt Risse und Leckagen aufgetreten. Risse am Kessel führen unweigerlich zu einem Verlust von Isolierflüssigkeit und damit in weiterer Folge zu einer Außerbetriebnahme des betroffenen Transformators. Deshalb sind Risse in der Kesselkonstruktion unbedingt zu vermeiden. Eine weitere Schwachstelle wurde bei der Analyse von Schadensfällen vor der Auslieferung gefunden. Diese befindet sich am geschweißten Übergang zwischen Wellwandversteifung und den Wellwandfinnen.

2. Die Erkenntnisse aus den Schadensberichten zeigen, dass die Schwachstellen ausschließlich im Bereich von Schweißverbindungen liegen. Deshalb wurden zerstörungsfreie und zerstörende Prüfungen im Bereich der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne durchgeführt. Dafür wurden Proben aus zwei verschiedenen Kesseln entnommen. Bei einem Kessel war bereits im Vorfeld bekannt, dass Risse in der Schweißnaht vorhanden sind. Beim zweiten Kessel gab es im Vorfeld der Untersuchungen keine Anzeichen für Unregelmäßigkeiten in diesem Bereich. Der zweite Kessel diente deshalb als Referenz. Die Bewertung der Unregelmäßigkeiten wurde gemäß DIN EN ISO 5818 – C durchgeführt. Der erste Schritt war eine Sichtprüfung und eine Farbeindringprüfung an den Schweißnahtproben. Diese beiden Untersuchungen ergaben mehrere unzulässige Unregelmäßigkeiten. Anschließend wurden Schliffproben aus der Schweißnaht entnommen, eingebettet und poliert. Bei den folgenden metallografischen Untersuchungen traten weitere unzulässige Unregelmäßigkeiten zu Tage. Als besonders kritisch zu bewerten sind ein Riss und mehrere Mikrorisse. Der Riss ist am Übergang zwischen der Schweißnaht der Wellwandfinne und der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne entstanden. Die Messung der Härte zeigte keine kritische Aufhärtung im Bereich der Schweißnaht. Um die Ergebnisse zu verifizieren sollten weitere Schweißnahtproben aus mehreren Kesseln entnommen werden.
3. Es wurde ein parametrisches 3D-Modell eines Wellwandkessels in PTC Creo 4 erstellt. Das 3D-Modell ermöglicht eine einfache Skalierung der Abmessungen. Dadurch können verschiedene Leistungsgrößen abgedeckt werden. Die komplexen Geometrien der Wellwände sind in dem 3D-Modell vereinfacht worden. Es wurde Wert auf eine einfache Vernetzbarkeit mit Hexaeder-Elementen gelegt. Das hat einen deutlich verringerten FEM-Berechnungsaufwand zur Folge. Für die Berechnung vernachlässigbare Komponenten, wie zum Beispiel Schutzgeräte oder Durchführungen, werden in dem 3D-Modell nicht berücksichtigt. Aus dem parametrischen Modell wurden drei Varianten des Kessels mit unterschiedlichen Versteifungskonzepten abgeleitet. Zusätzlich wurde ein Ersatzmodell für den Aktivteil erstellt. Dieses 3D-Modell ermöglicht es die Auswirkungen von Transportbelastungen auf den Aktivteil zu simulieren. Des Weiteren

können die Reaktionskräfte des Aktivteiles auf den Kesseldeckel ermittelt werden. Diese Kräfte sind in weiterer Folge notwendig für die FEM-Berechnung des Kessels

4. Das letzte Arbeitspaket beinhaltet die FEM-Berechnung an Aktivteil und Kessel eines ausgewählten Transformators. Als Referenz dient ein Photovoltaiktransformator mit einer Leistung von 5 MVA. Es handelt sich dabei um einen hermetisch verschlossenen Transformator. Das heißt der Transformator besitzt kein Dehngefäß. Für den Wellwandkessel wurden Lastannahmen erarbeitet, die die Transportbelastungen beschreiben sollen. Gemäß IEC 60076-1 wurde je ein statischer Lastfall für Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigung berechnet. Die Ergebnisse der FEM-Berechnungen am Gesamtmodell zeigen, dass der Lastfall Querbeschleunigung die höchsten Spannungen am Kessel hervorruft. Die größten Spannungen liegen im Bereich der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne. Submodellberechnungen zeigen, dass die Zonen größter Spannungen genau am Übergang zwischen den Wellwandfinnen und dieser Schweißnaht liegen. In diesem Bereich sind bei den Schadensfällen die Risse aufgetreten. Durch die zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen bei den unterschiedlichen Varianten können die Spannungen und Verformungen in einigen Bereichen reduziert werden. Im Bereich der Eckwellen zeigte sich jedoch kein Einfluss. Die Annahme hoher Spannungen im Bereich der Wellwandversteifungen konnte durch die Ergebnisse der Submodellberechnungen entkräftet werden. Abschließend wird auf die Ermüdungsfestigkeit eingegangen, daraus geht hervor, dass die untersuchte Schweißnaht für zyklische Belastungen ungeeignet ist.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es notwendig ist die Stahlbauteile von Verteiltransformatoren gegenüber von mechanischen Belastungen auszulegen. Transformatoren unterliegen im Betrieb zwar keinen äußerlichen mechanischen Belastungen. Allerdings kann es durch die auftretenden Transportbelastungen zu Beschädigungen an der Struktur kommen. Bei großen Transformatoren mit Wellwandkessel treten bereits durch den hydrostatischen Druck zufolge der Erdbeschleunigung hohe Spannungen am Wellwandkessel auf. Durch Belastungen während des Transportes werden diese Spannungen weiter erhöht. Insbesondere die Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne stellt eine Schwachstelle dar. Zum einen liegt die Schweißnaht in einem hochbelasteten Bereich und zum anderen ist die Geometrie der Schweißnaht ungünstig. Durch die ungünstige Geometrie ist die Schweißnaht bereits im Fertigungsprozess fehleranfällig. Beim Schweißprozess entstandene Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht können durch zyklische Belastungen während des Transportes Risse verursachen. Deshalb ist es in erster Linie wichtig, dass die Anforderungen an die Schweißnahtqualität eingehalten werden. In weiterer Folge ist die Konstruktion so auszuführen, dass die Spannungen im Bereich der Schweißnaht reduziert werden. Zusätzlich können die Transportbelastungen mit Hilfe von Transportdatenloggern überwacht und dokumentiert werden. Das bietet die Möglichkeit zur Identifikation von

schadensrelevanten Ereignissen. Allerdings geht aus den Untersuchungen auch hervor, dass dem Transformator mit Wellwandkessel hinsichtlich der Baugröße Grenzen gesetzt sind.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachte Schnittansicht eines Wellwandtransformators [1]	7
Abbildung 2: Radiatorkessel [1]	8
Abbildung 3: Explosionsdarstellung der Hauptkomponenten eines Wellwandkessels	9
Abbildung 4: Mechanische Belastungen während des Transports [3].....	10
Abbildung 5: Transportlasten an Bord eine Schiffes abhängig von der Verladeposition [5]	13
Abbildung 6: Transportkonzept für Transformatoren mit einer Masse > 4000 kg [1].....	15
Abbildung 7: Stoßereignis [13]	18
Abbildung 8: Kurvendiagramm eines Stoßereignisses	19
Abbildung 9: SFRA Messung an einer Transformatorwicklung vor und nach einem Vibrationstest. Rot: vor dem Vibrationstest. Blau: nach dem Vibrationstest [1].....	20
Abbildung 10: Draufsicht des Transformators mit rot eingezeichneten Schadensbereichen [1].....	22
Abbildung 11: Schäden im Bereich 1 [1]	23
Abbildung 12: Leckagestelle an Wellwand-Bodenwanne Schweißnaht (oben), von Lack befreite Leckagestelle [1].....	25
Abbildung 13: Gebrochene Schweißnähte an den Wellwandversteifungen [1].....	26
Abbildung 14: Deformation der Bodenwanne infolge des hydrostatischen Druckes und verformungsinduzierte Leckagen [1].	27
Abbildung 15: Schweißnahtdetail zwischen Bodenwanne und Wellwandfinne.....	29
Abbildung 16: Probenentnahmestelle an den beiden Transformatoren [1]	30
Abbildung 17: VT-Prüfung (oben) der beiden Proben (links Schweißnahtprobe 1, rechts Schweißnahtprobe 2), PT-Prüfung der beiden Proben (unten)	31
Abbildung 18: Schliffentnahme aus den Schweißnahtproben.....	32
Abbildung 19: Makroaufnahmen der Schliffe	32
Abbildung 20: Aufnahmen der ungeätzten Proben. Links: Gleichmäßig verteilte Porosität in den Schweißnähten.....	33

Abbildung 21: Probe 1 mit Riss am Übergang zwischen Schweißnaht der Wellwandfinne und Schweißnaht zwischen Bodenwanne und Wellwand.....	34
Abbildung 22: Härtemessung HV10 an Probe 1	35
Abbildung 23: CAD-Modell des untersuchten Transformators [1]	37
Abbildung 24: Wellwände mit vereinfachter Geometrie. Links Außenansicht. Rechts Innenansicht. .	38
Abbildung 25: Details von Wellwandversteifung und Schweißnahtmodellierung	38
Abbildung 26: Vereinfachter Wellwandkessel für Berechnung	39
Abbildung 27: Ersatzmodell für Aktivteilberechnung	40
Abbildung 28: Verschiedene Versteifungsvarianten.....	40
Abbildung 29: Gegenüberstellung von linearer und nichtlinearer Analyse. Links linear, rechts nichtlinear. [18].....	42
Abbildung 30: Kontaktflächen zwischen Aktivteil und Bodenwanne. Oben: Kontakt zwischen Bodenplatten und Bodenwanne bei Querbeschleunigung. Unten: Kontakt zwischen Aktivteil und Bodenwanne bei Längsbeschleunigung.	42
Abbildung 31: Reibungsfreier Kontakt zwischen Distanzleiste und Wellwand.....	43
Abbildung 32: Bilineares Materialgesetz.....	43
Abbildung 33: Vernetzung des Aktivteil. Rechts oben: Jochzugbolzen. Links unten: Kontaktnetz für Längsbeschleunigung. Rechts unten: Kontaktnetz für Querbeschleunigung.....	45
Abbildung 34: Vernetzung am Kessel.....	47
Abbildung 35: Vernetzung des Submodells.....	47
Abbildung 36: Innere Lastannahme am Kessel zur Berücksichtigung der Isolierflüssigkeit.....	49
Abbildung 37: Äußere Lastannahme für Querbeschleunigung am Kessel.	49
Abbildung 38: Lastaufbringung der Aktivteilkräfte	50
Abbildung 39: Ersatzmodell für die Berechnung der Reaktionskräfte des Aktivteiles auf den Kesseldeckel	51
Abbildung 40: Lastsetup für die Aktivteilberechnung mit Querbeschleunigung.	52
Abbildung 41: Lastsetup für Kesselberechnung mit Querbeschleunigung	53
Abbildung 42: Submodellrandbedingungen.....	54

Abbildung 43: Gesamtverschiebung am Aktivteil bei Querschleunigung	55
Abbildung 44: Links: Vergleichsspannung, rechts: plastische Vergleichsdehnung	55
Abbildung 45: Kraftreaktionen der einzelnen Muttern. Links: obere Mutter. Rechts: untere Mutter. 56	
Abbildung 46: Gesamtverformung am Kessel mit den verschiedenen Versteifungskonzepten. Von oben nach unten: ohne Gurt, mit Blechgurt, mit Formrohrgurt.....	58
Abbildung 47: Kritische Bereiche der Kesselversion ohne Gurt.....	59
Abbildung 48: Vergleichsspannung am Submodell im Bereich A.....	60
Abbildung 49: Plastische Vergleichsdehnung am Submodell im Bereich A [mm/mm]	61
Abbildung 50: Vergleichsspannung am Submodell im Bereich B.....	61
Abbildung 51: Vergleichsspannung unter alleiniger Einwirkung der Erdbeschleunigung. Oben: Bereich A. Unten: Bereich B.	62
Abbildung 52: Vergleichsspannung am Submodell für Bereich D.....	63
Abbildung 53: Vergleichsspannungen für die Bereiche A und B.....	64
Abbildung 54: Nennspannungsauswertung an der Schweißnaht. Links: Lastfall 1 g Querschleunigung. Rechts: Lastfall nur Erdbeschleunigung.	65
Abbildung 55: FAT-Klasse 614 im Vergleich zur tatsächlich vorhandenen Schweißnaht [23].	66
Abbildung 56: Wöhlerkurve mit FAT-Klassen. Blau: FAT-Klasse 614. Rot: reduzierte FAT-Klasse für vorliegende Schweißnaht [23].....	67
Abbildung 57: Zusätzliche Proben aus der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne	78
Abbildung 58: PT-Prüfung an den zusätzlichen Schweißnahtproben	79
Abbildung 59: Links oben: Probe 2 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne innen. Rechts oben: Probe 1 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne innen. Links unten: Probe 2 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne innen. Rechts unten: Probe 2 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne außen	80
Abbildung 60: Links oben: Schweißnaht Wellwandfinne Probe 3. Rechts oben: Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne Probe 1. Links unten: Riss in Probe 1. Rechts unten: Übergang Schweißnaht zu Bodenwanne Probe 1.	80
Abbildung 61: Härtemessungen HV10. Oben: Probe 2. Unten: Probe 3.....	81

Abbildung 62: Lastsetups für Längs und Vertikalbeschleunigung. Oben: Längsbeschleunigung. Unten: Vertikalbeschleunigung..... 82

Abbildung 63: Lastsetup für Längsbeschleunigung am Aktivteil..... 83

Abbildung 64: Ergebnisse der FEM-Berechnung am Gesamtmodell für Querbeschleunigung. Oben: Kessel mit Blechgurt. Unten: Kessel mit Formrohrgurt..... 84

Abbildung 65: FEM-Ergebnisse am Gesamtmodell für Längsbeschleunigung. Von oben nach unten: ohne Versteifung, mit Blechgurt, mit Formrohrgurt..... 85

Abbildung 66: FEM-Ergebnisse am Gesamtmodell für Vertikalbeschleunigung. Von oben nach unten: ohne Versteifung, mit Blechgurt, mit Formrohrgurt..... 86

Abbildung 67: Ergebnisse der FEM-Berechnungen am Submodell im Bereich A für Querbeschleunigung. Oben: Ausführung mit Blechgurt. Unten: Ausführung mit Formrohr 87

Abbildung 68: Ergebnisse der FEM-Berechnungen am Submodell im Bereich B für Querbeschleunigung. Oben: Ausführung mit Blechgurt. Unten: Ausführung mit Formrohr. 88

Abbildung 69: Werkstoffdaten aus Zugversuchen für DC01 längs zur Walzrichtung. [1] 89

Abbildung 70: Werkstoffdaten aus Zugversuchen für DC01 quer zur Walzrichtung. [1]..... 90

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschleunigungswerte für den Straßentransport in g [7]. 12

Tabelle 2: Beschleunigungswerte für den Seetransport in g [7]. 12

Tabelle 3: Transportbelastungen für Schienentransport gemäß CTU-Code in g [7]. 14

Tabelle 4: Transportbelastungen im Schienenverkehr gemäß UIC in g [9]. 14

Tabelle 5: Lastfälle gemäß DIN EN 12663-2 [10]. 14

Tabelle 6: Beobachtete Unregelmäßigkeiten..... 33

Tabelle 7: Vergleich von Flächenträgheitsmoment und Masse von Formrohr- und Blechgurt. 41

Tabelle 8: Werkstoffkennwerte für bilineare Verfestigung [21][22]. 44

Tabelle 9: Lastfälle gemäß IEC 60076-1..... 48

Tabelle 10: Kraftreaktionen am Deckel durch den Aktivteil. 56

Tabelle 11: Verformungswerte der verschiedenen Kesselversionen..... 57

11 Literaturverzeichnis

- [1] SIEMENS AG.
- [2] H. J. Abts, *Verteil-Transformatoren*. Berlin: VDE Verlag, 2017.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "Transportbelastungen," DIN 30786-1, 2015.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "Schwingungen und schwingungsfähige Systeme," DIN 1311-1, 2000.
- [5] Fachinformationen der Deutschen Transportversicherer, "Containerhandbuch," 2019. [Online]. Available: <https://www.containerhandbuch.de/chb/stra/index.html>. [Accessed: 03-Jul-2019].
- [6] SMT ELEKTRONIK GmbH, "Transport stoßempfindlicher Güter," Dresden, 2019.
- [7] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *CTU-Code*. Dortmund: Verkehrsblatt - Verlag, 2015.
- [8] A. Mjelve and J. Hermans, *Guide on transformer transportation*. Paris: CIGRE, 2016.
- [9] International Union of Railways, *RIV Appendix II - Section 1: Principles*. Paris: UIC, 2004.
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen," DIN EN 12663-2, 2010.
- [11] International Electrotechnical Commission, "Power transformers," IEC 60076-1, 2011.
- [12] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Guide for the Transportation of Transformers and Reactors Rated 10 000 kVA or Higher*. New York City: IEEE, 2013.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "Transportüberwachung mit automatischen Aufzeichnungsgeräten zur Messung stochastisch auftretender Stöße," DIN EN 15433-6, 2016.
- [14] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*. New York City: IEEE, 2013.
- [15] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren, "Schweißen von Schwarz-Weiß-Verbindungen," DVS Merkblatt 3011, 2017.
- [16] G. Petzow and V. Carle, *Metallographisches, keramographisches, plastographisches Ätzen*. Stuttgart: Borntraeger, 2006.
- [17] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens*. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [18] C. Gebhardt, *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench*. München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [19] Nynas AB, "Sicherheitsdatenblatt Nynas Nytro Taurus," p. 7, 2008.
- [20] M. Dieter, H. Wittel, D. Jannasch, and J. Voßiek, *Roloff/Matek Maschinenelemente Tabellen*. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2005.
- [21] ThyssenKrupp AG, "Materialdatenblatt S235," 2019.
- [22] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., "Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl," DIN EN ISO 898-1, 2013.
- [23] A. F. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Cham: Springer, 2016.

12 Anhang

12.1 Zerstörungsfreie und zerstörende Schweißnahtuntersuchungen

Es wurden zusätzliche Schweißnahtproben aus dem beschädigten Transformator mit Aufstellungsort Westeuropa entnommen. Diese zeigten bei den PT-Prüfungen keine Auffälligkeiten und wurden deshalb für die weiteren Untersuchungen nicht verwendet. Allerdings ist die optische Ausführungsqualität auch in diesen Bereichen ähnlich zu der untersuchten Probe.

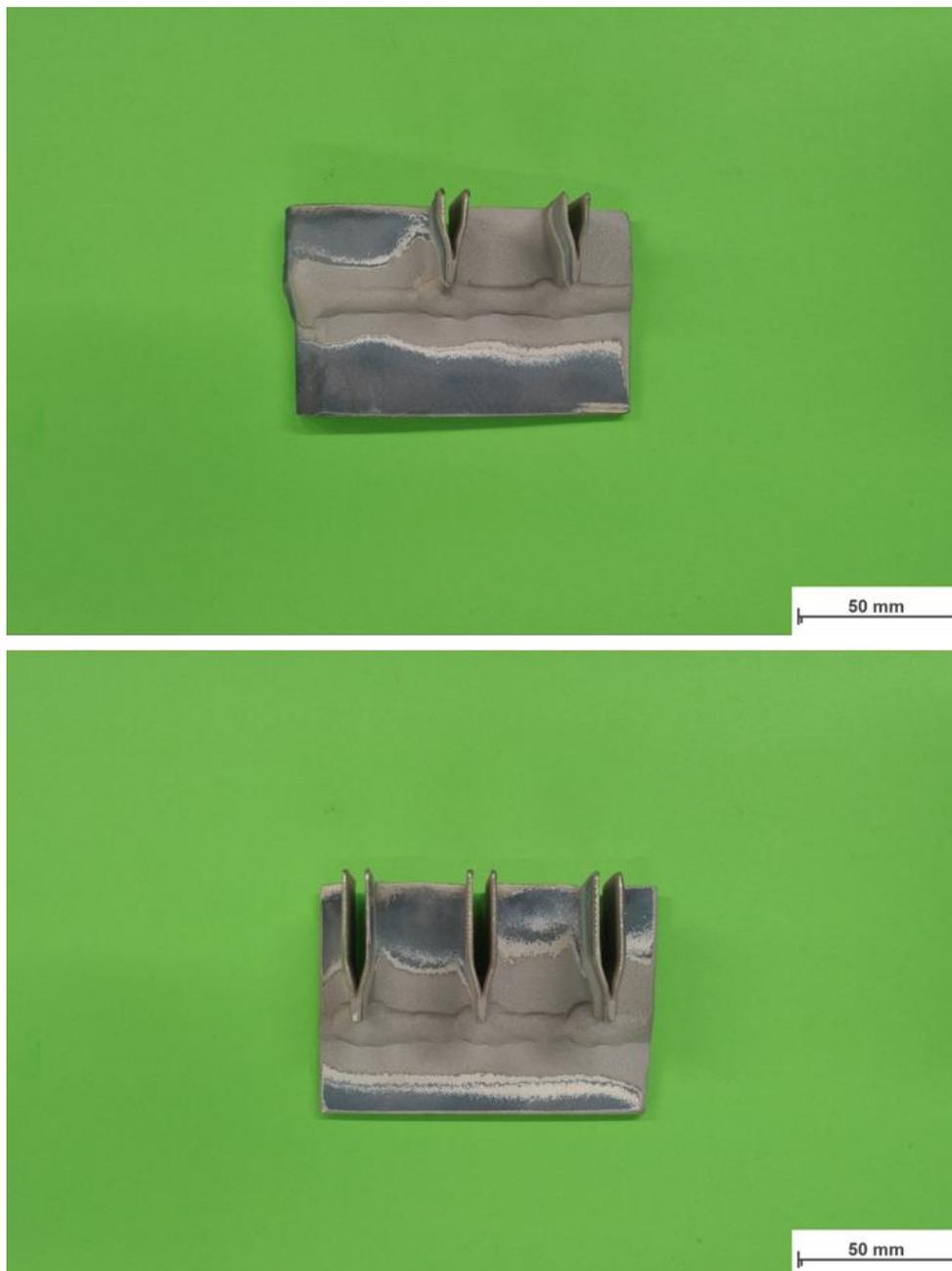


Abbildung 57: Zusätzliche Proben aus der Schweißnaht zwischen Wellwand und Bodenwanne

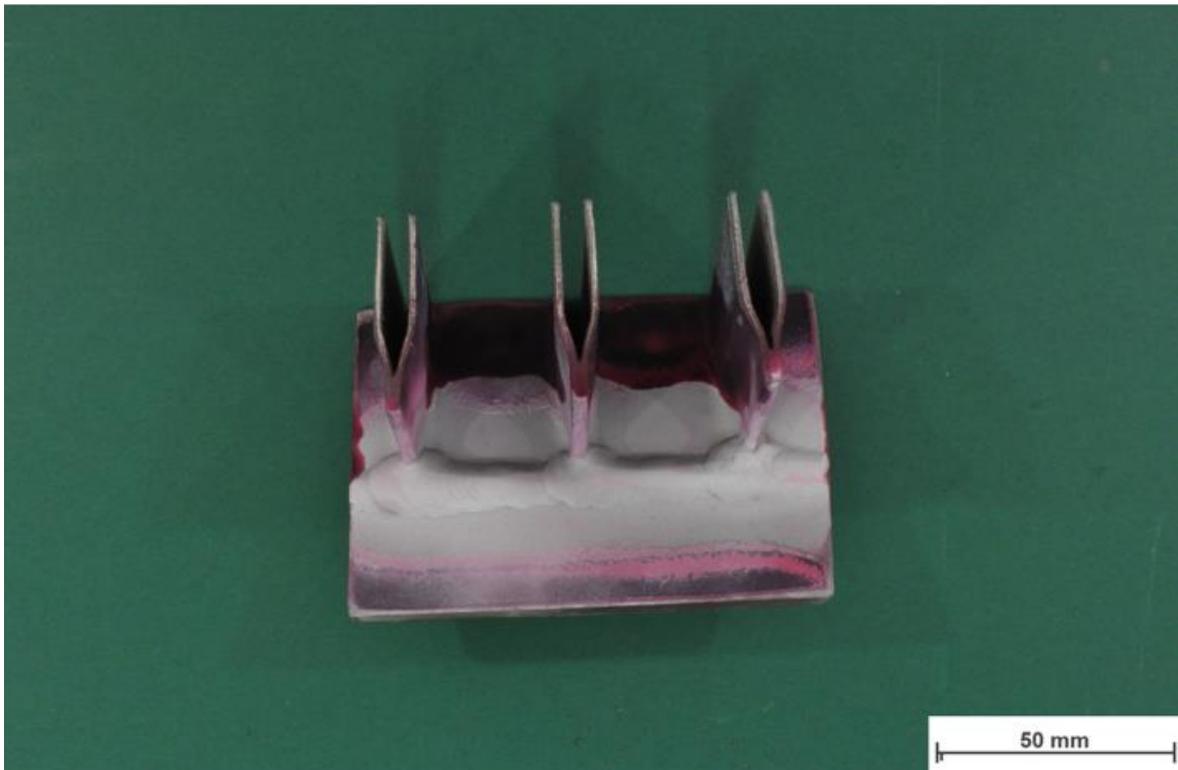
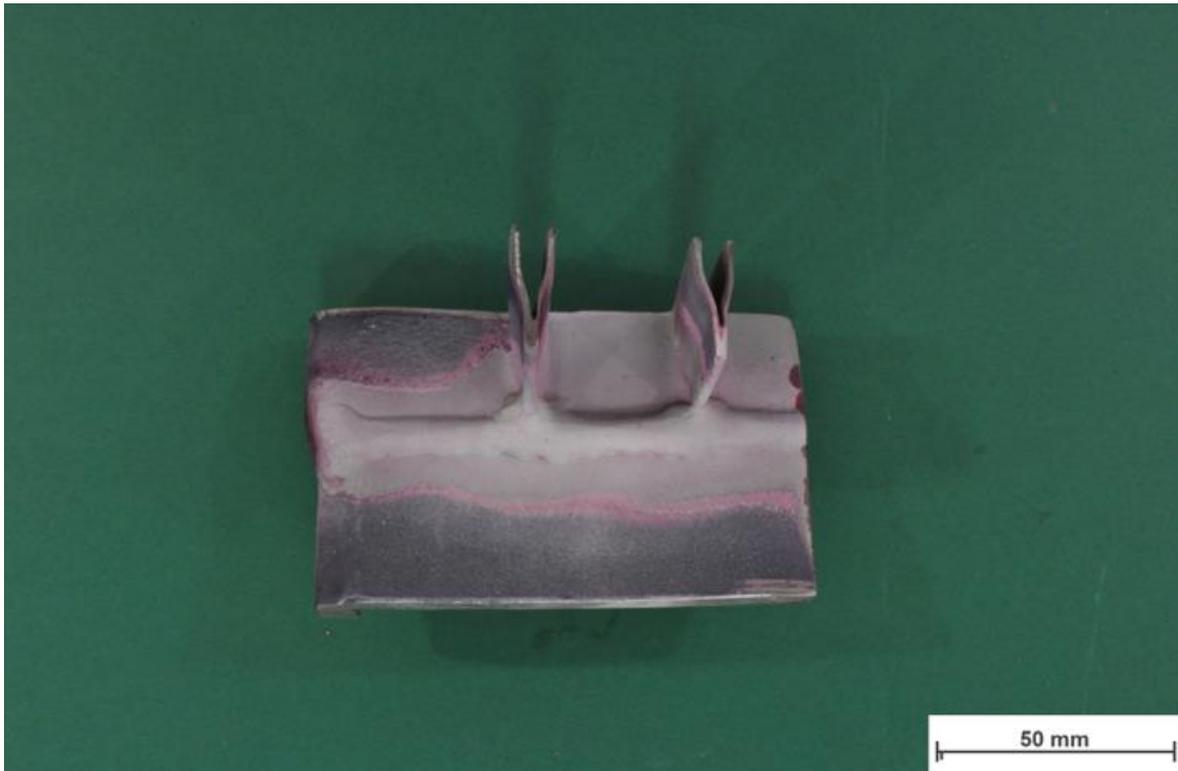


Abbildung 58: PT-Prüfung an den zusätzlichen Schweißnahtproben

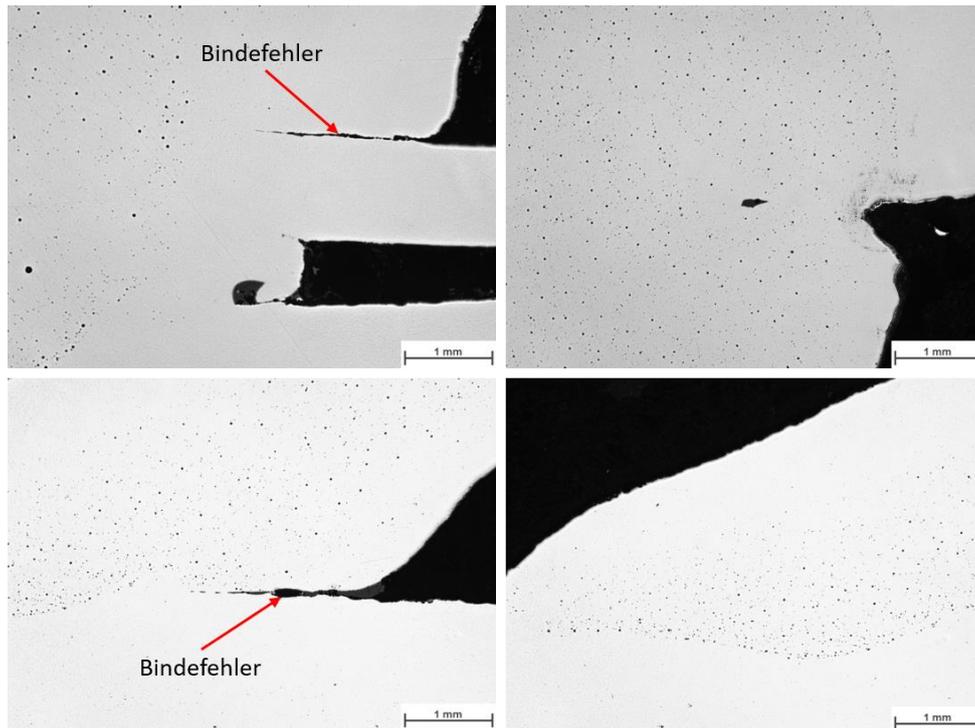


Abbildung 59: Links oben: Probe 2 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne innen. Rechts oben: Probe 1 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne innen. Links unten: Probe 2 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne innen. Rechts unten: Probe 2 Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne außen

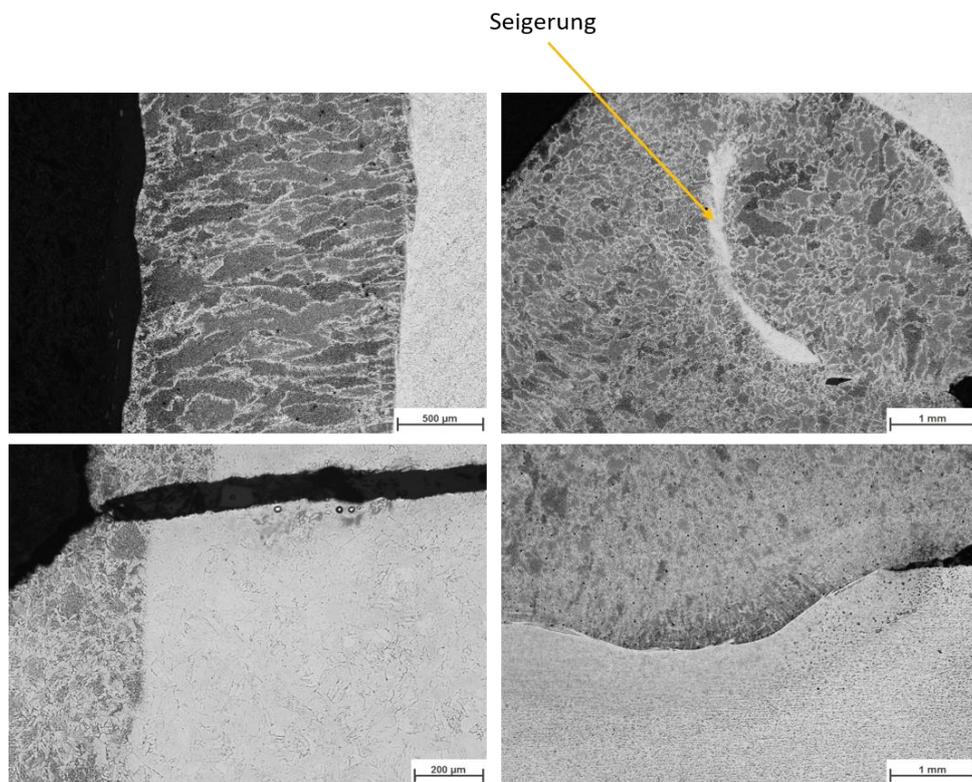


Abbildung 60: Links oben: Schweißnaht Wellwandfinne Probe 3. Rechts oben: Schweißnaht Wellwand-Bodenwanne Probe 1. Links unten: Riss in Probe 1. Rechts unten: Übergang Schweißnaht zu Bodenwanne Probe 1.

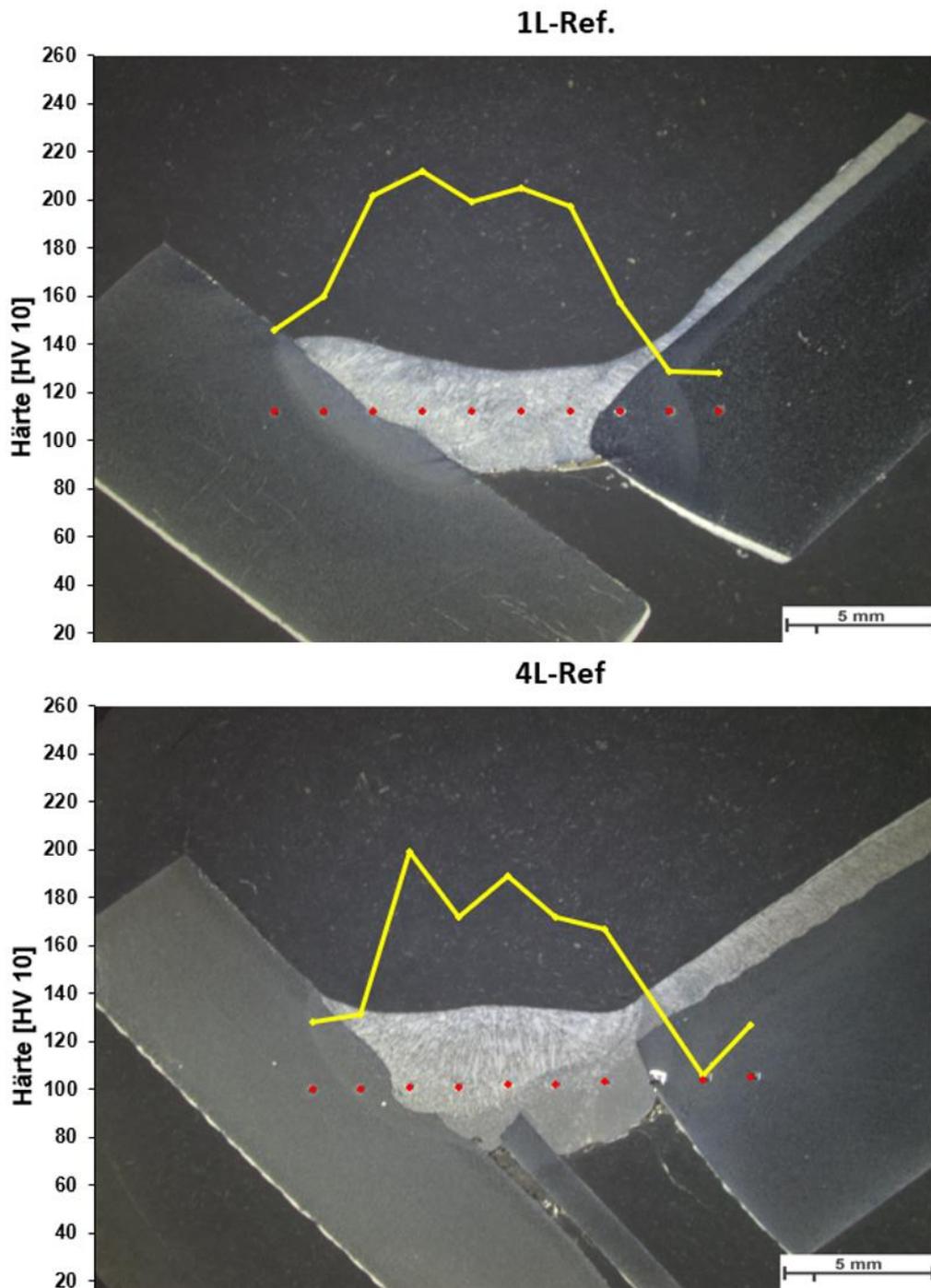


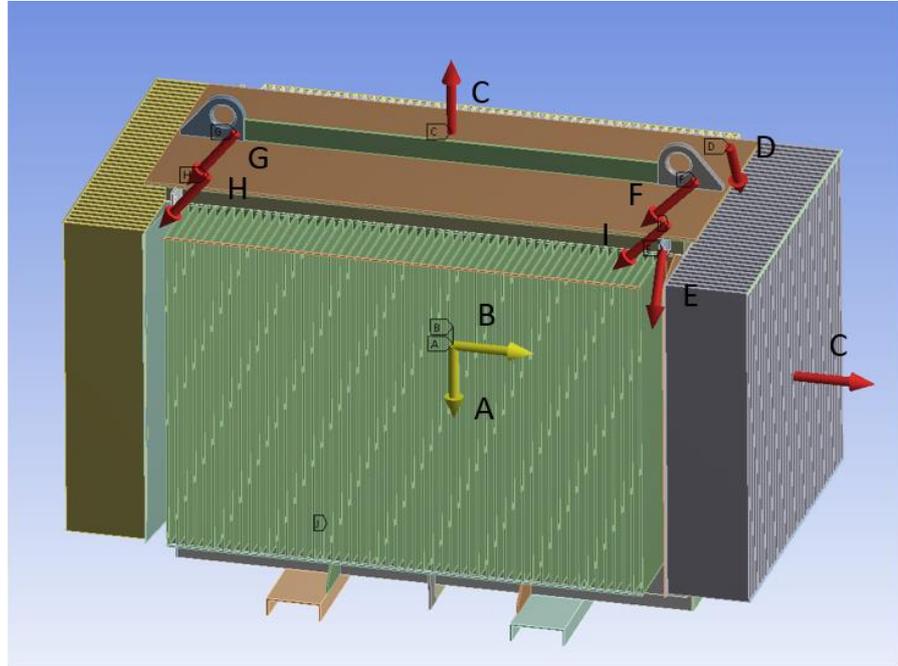
Abbildung 61: Härtemessungen HV10. Oben: Probe 2. Unten: Probe 3.

12.2 Lastsetups

In Abbildung 62 ist das Lastsetup für die Längs- und die Vertikalbeschleunigung dargestellt. Diese Lastsetups wurden für alle 3 Kesselvarianten verwendet.

F: 1g Längs
 Statisch-mechanisch
 Zeit: 1, s
 Elemente: 10 von 11 angezeigt
 21.08.2019 09:30

- A** Erdanziehungskraft: 9806,6 mm/s²
- B** Beschleunigung: 9810, mm/s²
- C** Variable Last: Hydrostatischer Druck
- D** Gurtkraft: 9999,8 N
- E** Gurtkraft: 9999,8 N
- F** M2: 5890,7 N
- G** M1: 6290, N
- H** M4: 6290, N
- I** M3: 5890,7 N



H: 1g Vertikal
 Statisch-mechanisch
 Zeit: 1, s
 21.08.2019 09:40

- A** Erdanziehungskraft: 9806,6 mm/s²
- B** Beschleunigung: 9810, mm/s²
- C** Variable Last: Hydrostatischer Druck

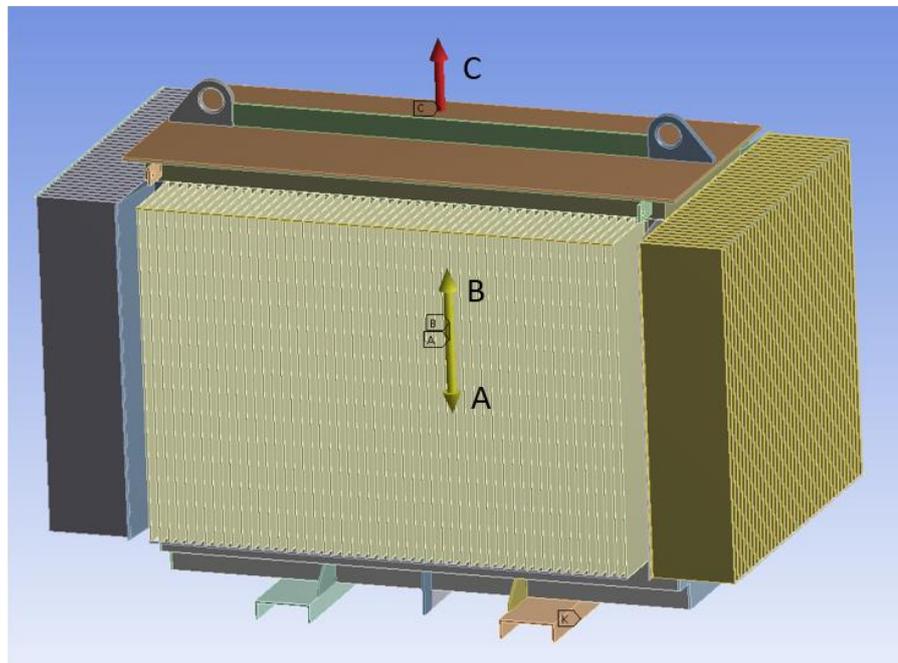


Abbildung 62: Lastsetups für Längs und Vertikalbeschleunigung. Oben: Längsbeschleunigung. Unten: Vertikalbeschleunigung.

In Abbildung 63 ist das Lastsetup am Aktivteil für die Längsbeschleunigung dargestellt.

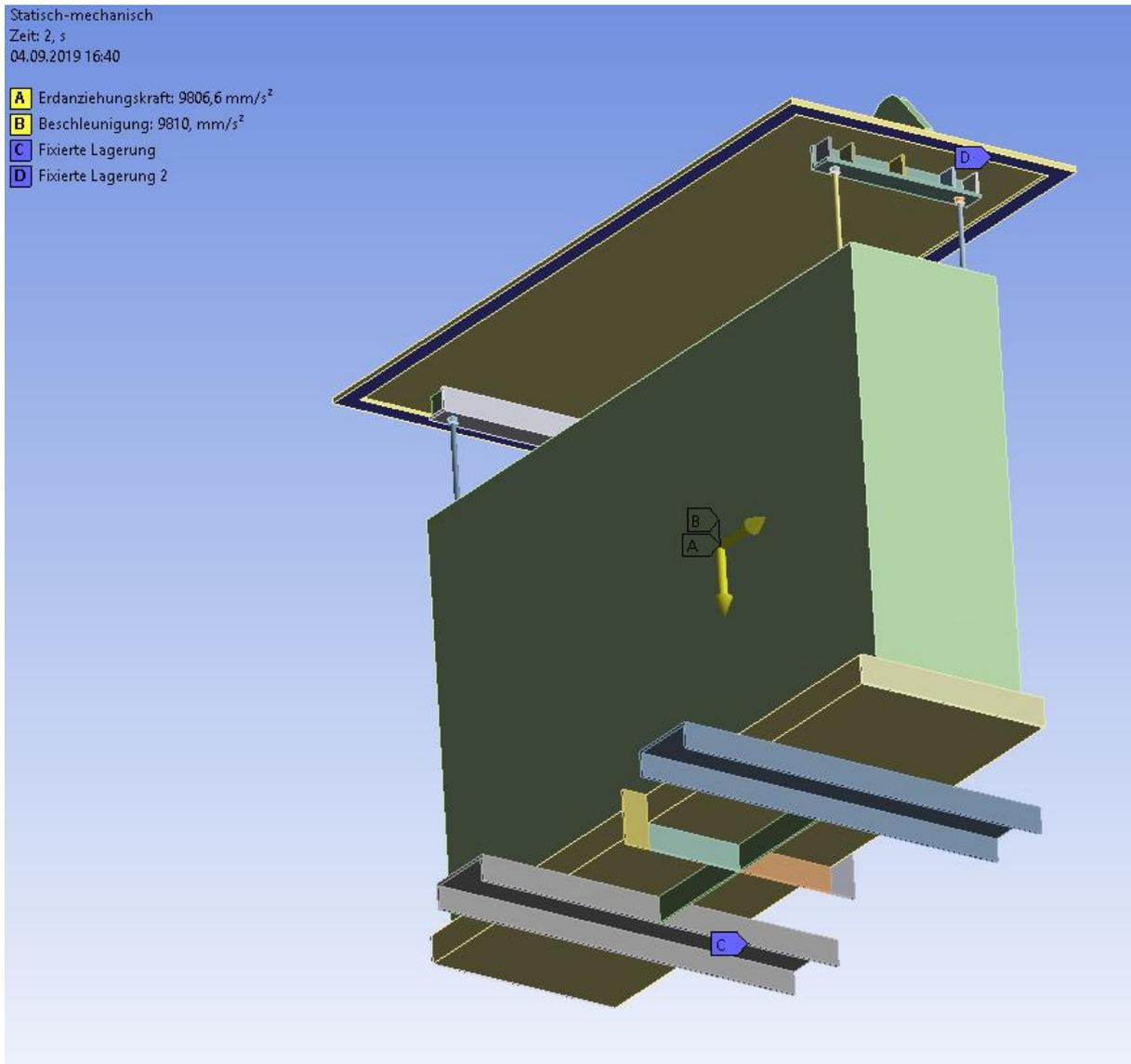


Abbildung 63: Lastsetup für Längsbeschleunigung am Aktivteil.

12.3 FEM-Ergebnisse

Im Folgenden sind weitere Ergebnisse der FEM-Berechnungen dargestellt. Die Farbskalierung in Abbildung 64 gilt ebenfalls für Abbildung 65 und Abbildung 66.

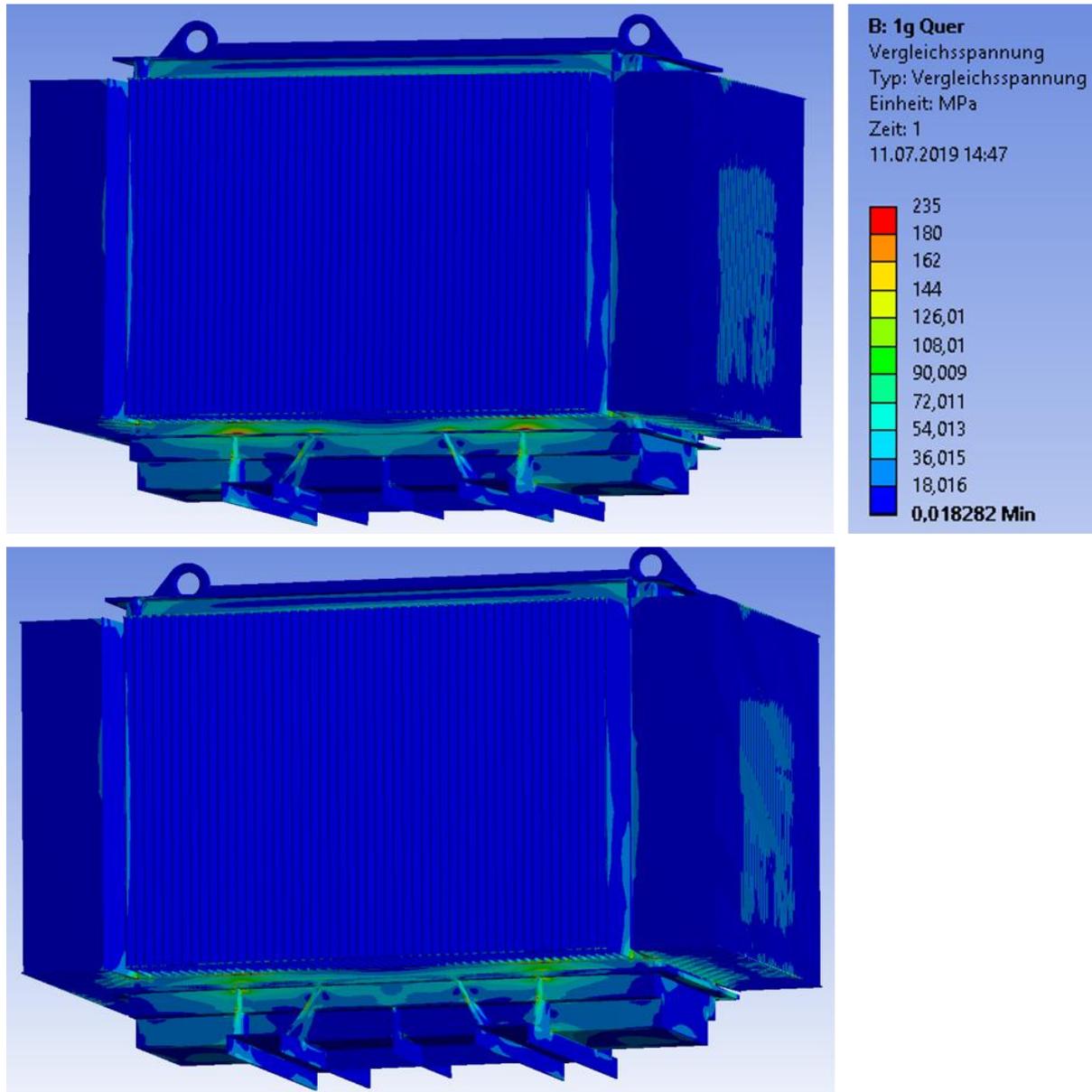


Abbildung 64: Ergebnisse der FEM-Berechnung am Gesamtmodell für Querbeschleunigung. Oben: Kessel mit Blechgurt. Unten: Kessel mit Formrohrgurt.

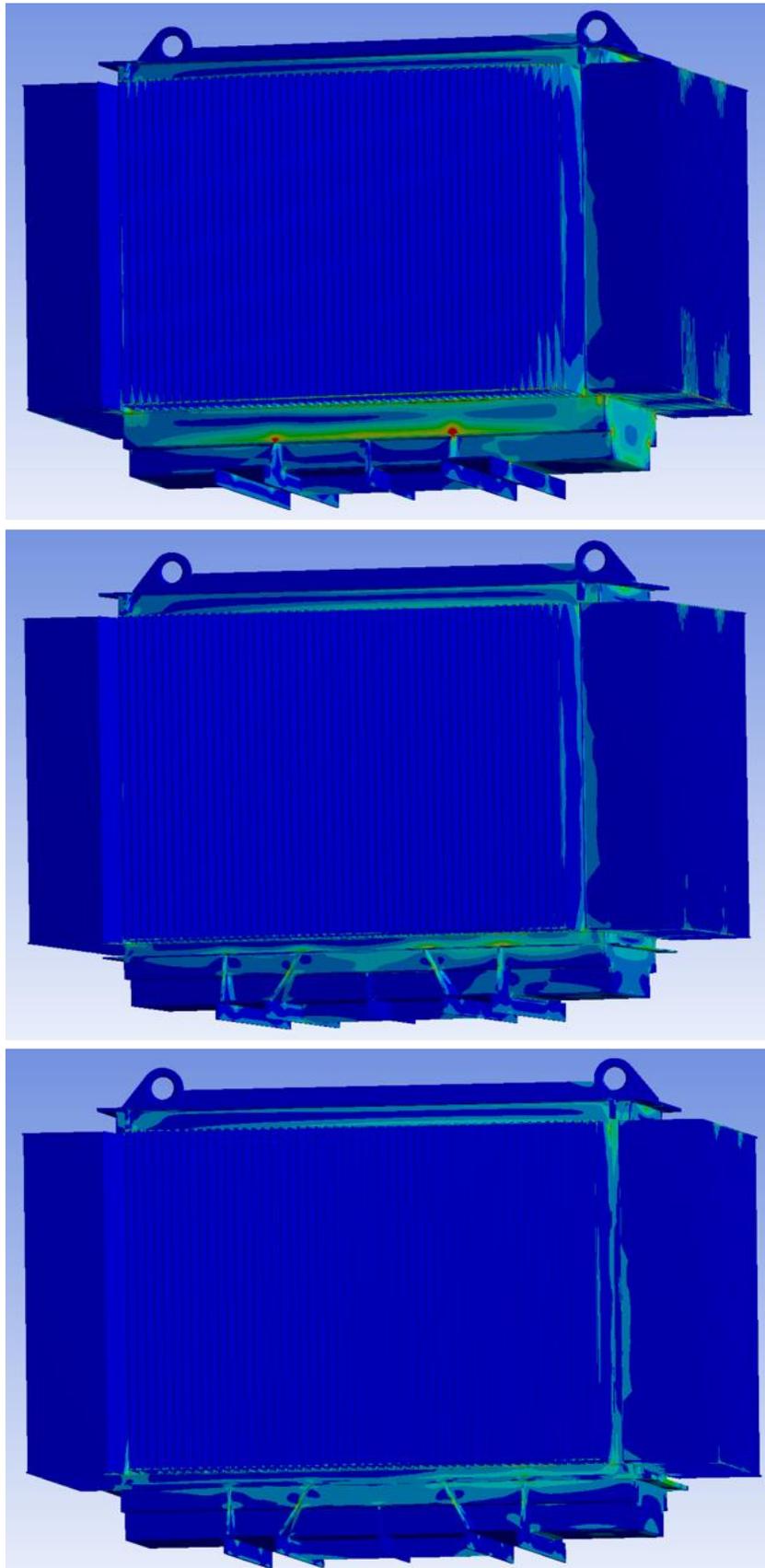


Abbildung 65: FEM-Ergebnisse am Gesamtmodell für Längsbeschleunigung. Von oben nach unten: ohne Versteifung, mit Blechgurt, mit Formrohrgurt.

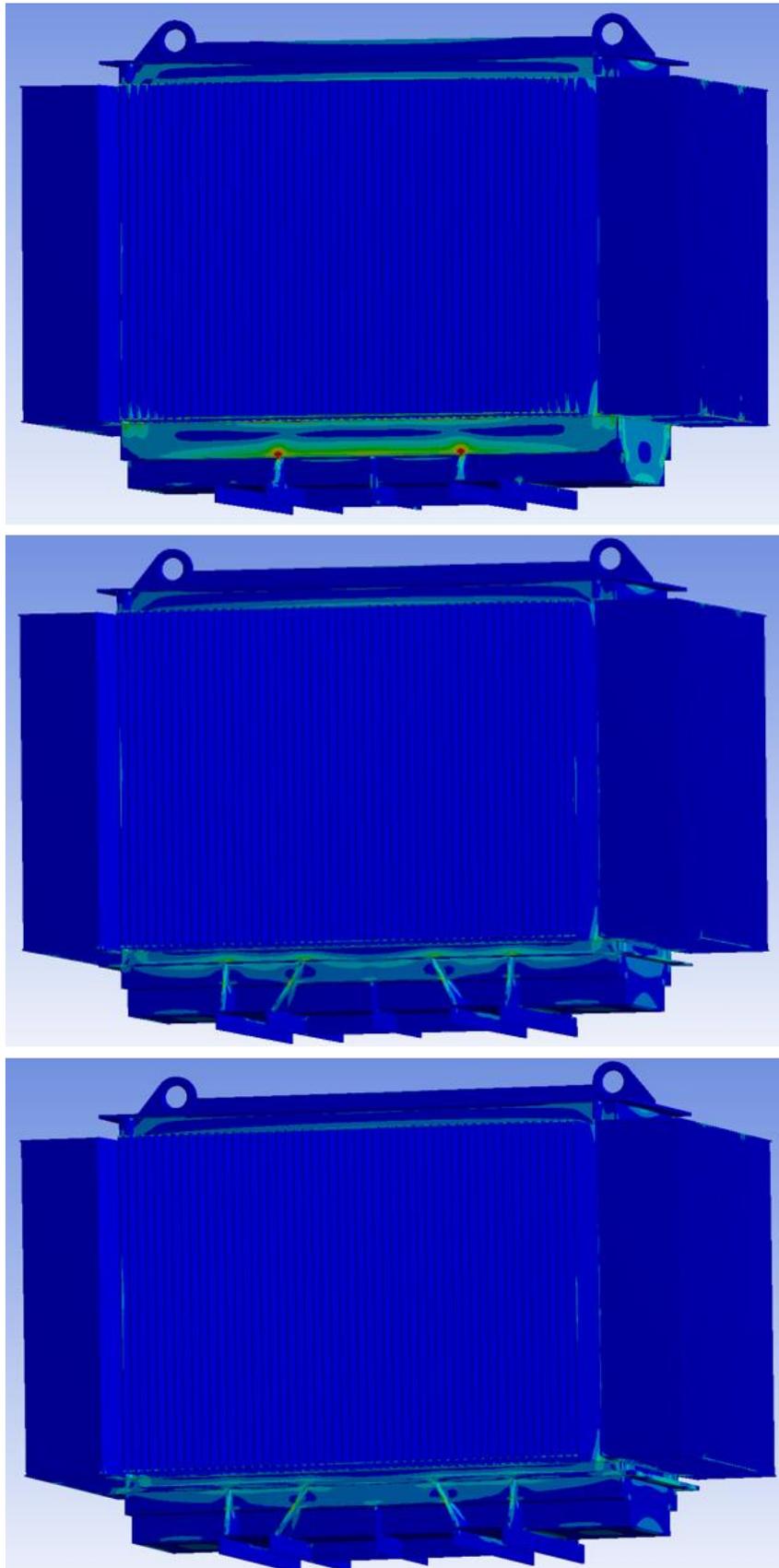


Abbildung 66: FEM-Ergebnisse am Gesamtmodell für Vertikalbeschleunigung. Von oben nach unten: ohne Versteifung, mit Blechgurt, mit Formrohrgurt.

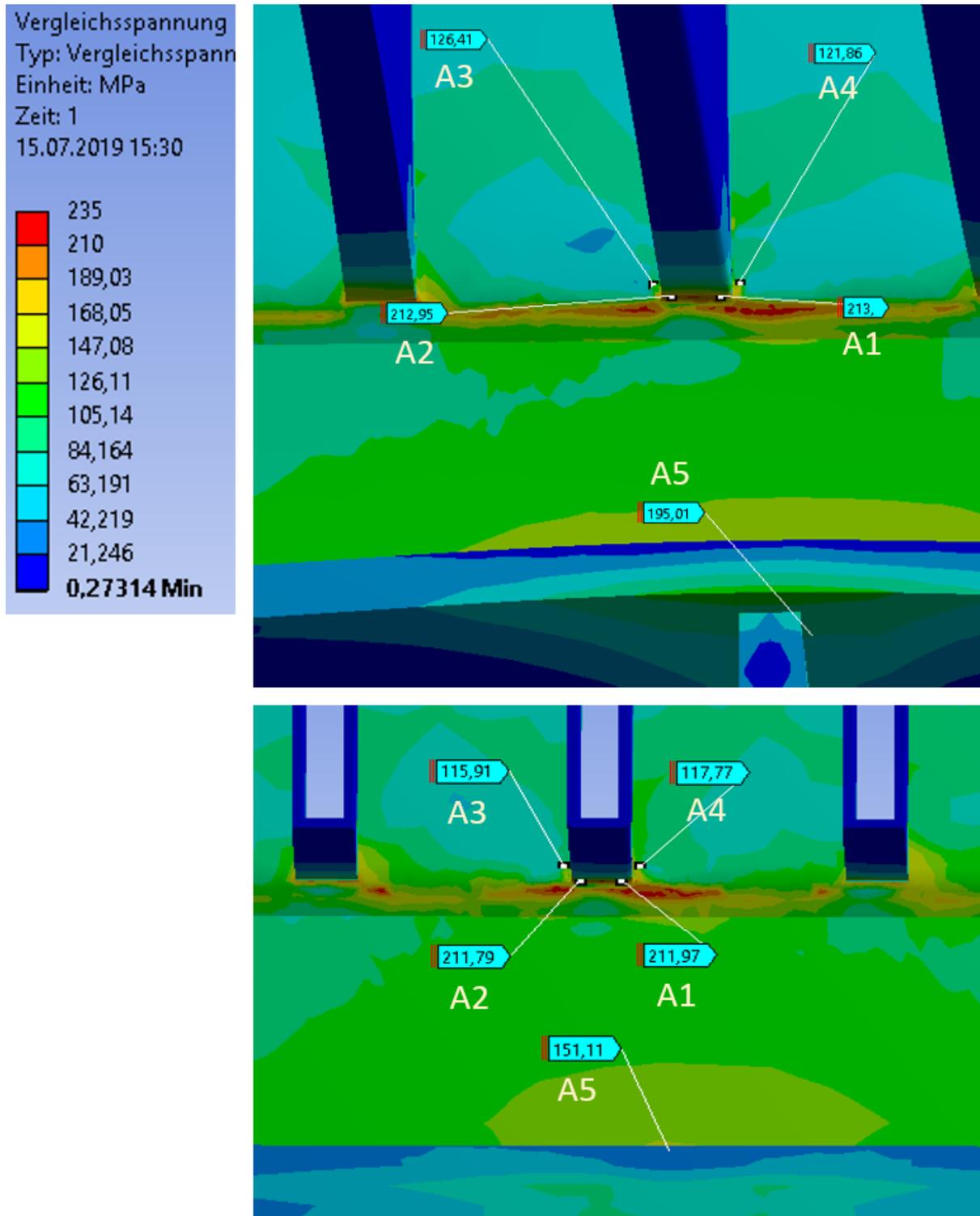


Abbildung 67: Ergebnisse der FEM-Berechnungen am Submodell im Bereich A für Querbeschleunigung. Oben: Ausführung mit Blechgurt. Unten: Ausführung mit Formrohr

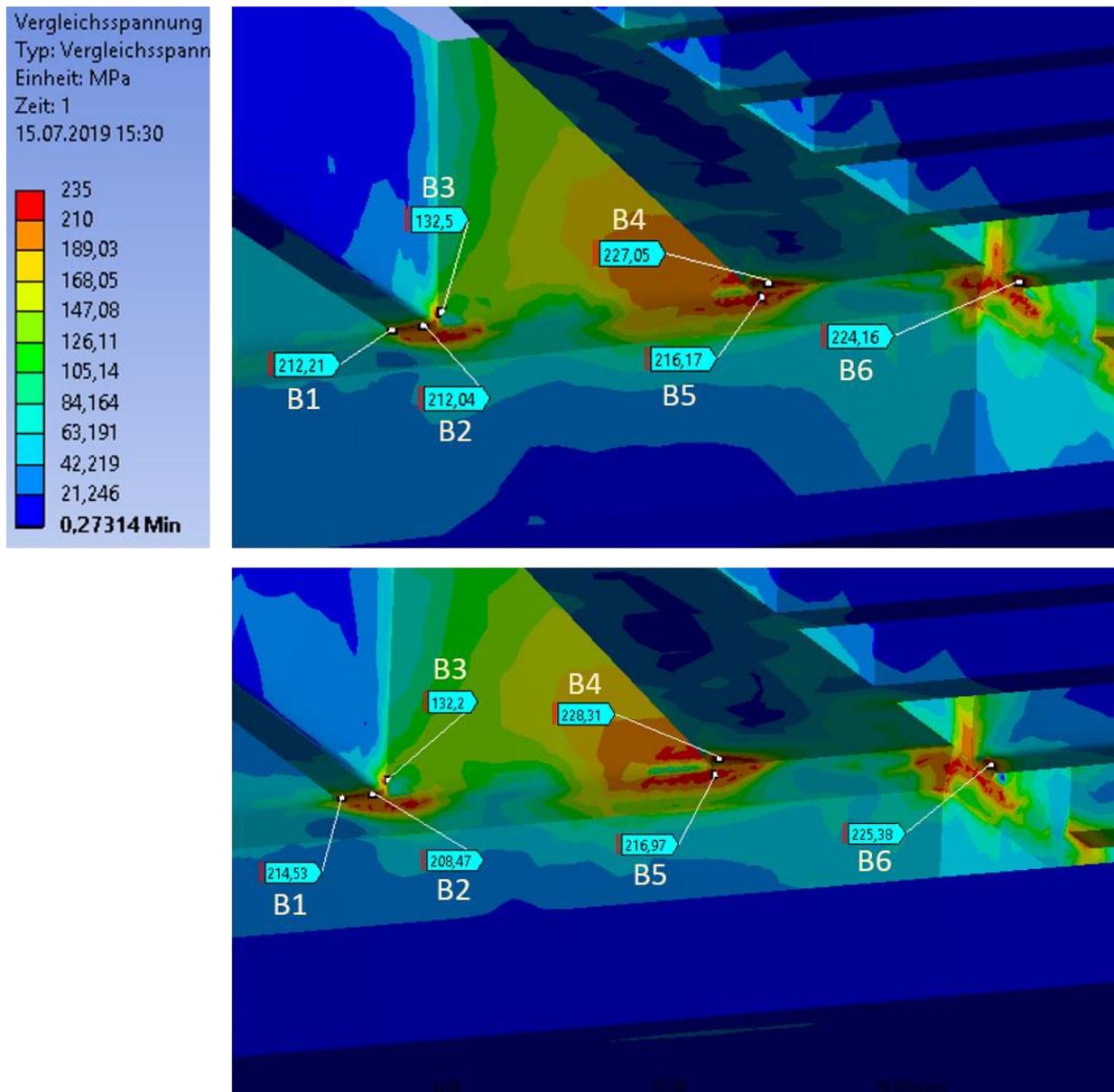


Abbildung 68: Ergebnisse der FEM-Berechnungen am Submodell im Bereich B für Querschleunigung. Oben: Ausführung mit Blechgurt. Unten: Ausführung mit Formrohr.

12.4 Werkstoffdaten aus Zugversuchen

Prüfbericht Nr.:65/17
13.07.2017

GH-RD2

ANDRITZ
Hydro

Parametertabelle:

Kunde	: Siemens	Messlänge Standardweg	: 80 mm
Material	: DC01_1,2mm_Längs	Vorkraft	: 15 N/mm ²
Prüfer	: Schmallegger	Geschwindigkeit Rp, ReH	: 0,0008 1/s
Prüfnorm	: Zugversuch_EN 10130	Prüfgeschwindigkeit	: 0,0042 1/s

Ergebnisse:

L=Längsprobe / Q=Querprobe / K= Kopfbruch (Bruch außerhalb Dehnungsaufnehmer)

Legende	Nr	Probenbreite b0 mm	Probendicke a0 mm	Rp 0.2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	ε-Bruch %
□	1	20,00	1,2	210	-	336	36,3
□	2	20,00	1,2	211	-	337	36,2
□	3	20,00	1,21	212	-	338	36,0
□	4	20,00	1,21	212	-	336	35,9
□	5	20,00	1,21	211	-	334	34,3

Seriengrafik:

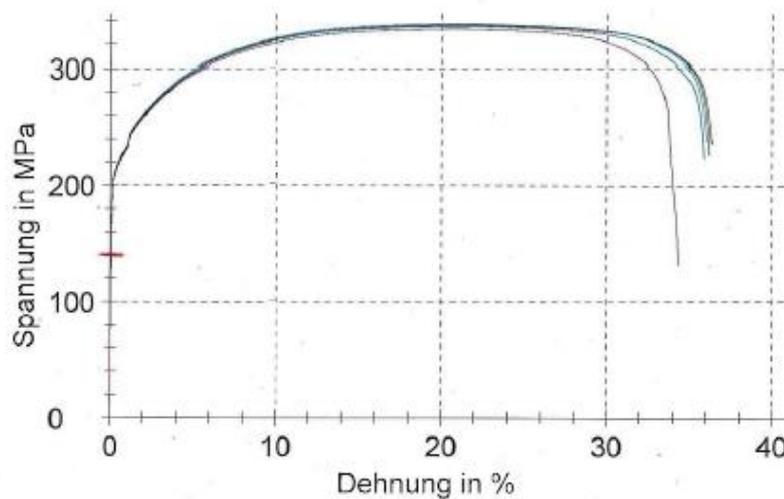


Abbildung 69: Werkstoffdaten aus Zugversuchen für DC01 längs zur Walzrichtung. [1]

Prüfbericht Nr.:65/17
13.07.2017

GH-RD2



Parametertabelle:

Kunde	: Siemens	Messlänge Standardweg	: 80 mm
Material	: DC01_1,2mm_quer	Vorkraft	: 15 N/mm ²
Prüfer	: Schmalegger	Geschwindigkeit Rp, ReH	: 0,0008 1/s
Prüfnorm	: Zugversuch_EN 10130	Prüfgeschwindigkeit	: 0,0042 1/s

Ergebnisse:

L=Längsprobe / Q=Querprobe / K= Kopfbruch (Bruch außerhalb Dehnungsaufnehmer)

Legende	Nr	Probenbreite b0 mm	Probenstärke a0 mm	Rp 0.2 MPa	ReH MPa	Rm MPa	ε-Bruch %
□	1	20,00	1,2	220	-	336	36,6
□	2	20,00	1,2	221	-	339	36,3
□	3	20,00	1,2	222	-	340	36,6
□	4	20,00	1,2	221	-	337	37,4
□	5	20,00	1,21	219	-	336	37,0

Seriengrafik:

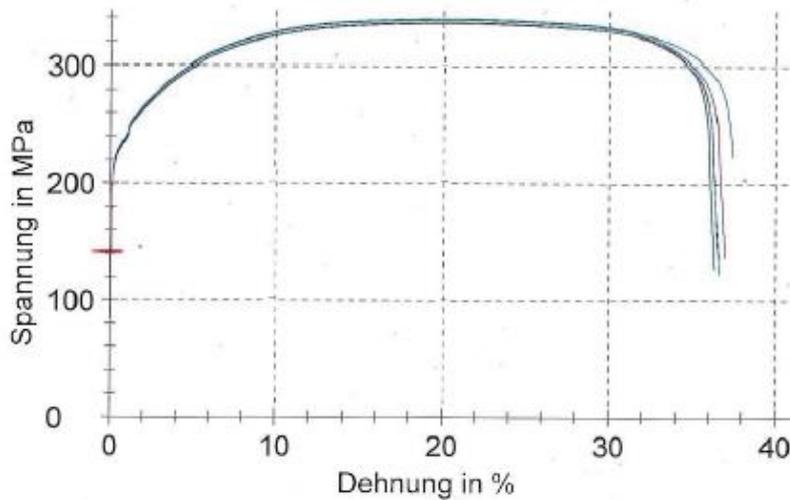


Abbildung 70: Werkstoffdaten aus Zugversuchen für DC01 quer zur Walzrichtung. [1]