

Präzise Gleislage durch innovative Stopfmaschinen

Teil 1: Entwicklung der Bodenverdichtung

FLORIAN AUER | BERNHARD ANTONY |
FRITZ KOPF | CHRISTIAN KOZWARA

Ein umfangreiches Verständnis über die Vorgänge während der Schotterverdichtung ist fundamental für die Entwicklung innovativer Verdichtungsgeräte. Teil 1 des Beitrags „Präzise Gleislage durch innovative Stopfmaschinen“ beschäftigt sich mit der technischen Entwicklung maschineller Verdichtungsgeräte und wie diese den Gleisbau revolutionieren.

Grundlagen der bodenmechanischen Verdichtung

Zweck der bautechnischen Bodenverdichtung

Die Bodenverdichtung hat bautechnisch mehrere Aufgaben zu erfüllen. Nach der baupraktischen Relevanz geordnet sind dies:

- Vorwegnahme der Setzungen und Verformungen
- Erhöhung der Steifigkeit
- Verringerung der Durchlässigkeit
- Erhöhung der Materialdichte.

Auffallend ist, dass die letztgenannte, namensgebende Aufgabe überhaupt nur bei Sonderanwendungen (Ballastierung, Strahlenschutz etc.) relevant ist. Mit großem Abstand am wichtigsten ist der erste Punkt: Vorwegnahme der

Setzungen und Verformungen. Deformationen, die an der fertigen Konstruktion unter Regelbelastung auftreten, können zu Problemen führen. Eine gleichmäßige Setzung der gesamten Konstruktion würde dabei nur eine – in der Regel unproblematische – Parallelverschiebung zur Folge haben. Ungleichmäßige Setzungen verursachen jedoch Probleme, was vor allem für den Gleisschotter gilt. Dieser hat eine stabile Gleislage sicherzustellen und als Teil der Federung eine möglichst konstante Steifigkeit aufzuweisen. Im unverschmutzten Schotter ist die Durchlässigkeit im besten Falle dabei so hoch, dass sie praktisch verdichtungsunabhängig ist. Die Materialdichte ist höchstens für die Materialbestellung von Bedeutung, spielt im Betrieb jedoch keine besondere Rolle.

Im Folgenden geht es um die Verdichtung des Gleisschotters und die prozessbegleitende Messung der Schottersteifigkeit. Ziel ist es, die Verdichtung zu optimieren und dabei die Entwicklung der Schottersteifigkeit zu dokumentieren. Eine hohe Gleichmäßigkeit der Schottersteifigkeit bei optimaler Verdichtung lässt eine langanhaltend gute Gleislage prognostizieren. Bei Verdichtung auf einen gewissen Zielwert liegt dieser jedenfalls unterhalb des Maximalwerts des Materials. Das Erreichen des Zielwerts führt zum Abbruch des Vorgangs, ohne alle Möglichkeiten der Verdichtbarkeit ausgeschöpft zu haben und die Setzungen vorwegzunehmen. Damit wird die wichtigste Aufgabe der Schotterverdichtung nur bedingt

erreicht. Die Idee, Unregelmäßigkeiten in der Materialzusammensetzung und in den Untergrundeigenschaften durch bewusst unvollständige Verdichtung kompensieren zu wollen, verschlimmert in der Regel die ohnehin nicht idealen Bedingungen.

Allgemeine Entwicklung der Bodenverdichtung

Um den Leitgedanken in der Entwicklung der Gleisschotterverdichtung zu verdeutlichen, folgen ein kurzer Abriss der Entwicklung von artverwandten Verdichtungstechnologien (Abb. 1) der Bodenverdichtung und die dabei gewonnenen Erfahrungen aus Sicht der Autoren.

Grobkörnige granulare Materialien werden für baupraktische Zwecke mittels geeigneter Geräte verdichtet, die ursprünglich manuell angetrieben wurden. Die Erfindung von Dampf- und Verbrennungsmotoren führte zu einem Wechsel der Antriebsart. Seither werden maschinelle Verdichtungsgeräte empirisch weiterentwickelt, um die Effizienz weiter zu steigern. Fanden früher (um 1930) die bautechnischen Verdichtungs Vorgänge eher durch hohe Auflast (z.B. Abwalzen mittels Dampfwalze) oder impulsartige Belastung (z.B. Ramme, Fallgewichtsverdichtung, manuelles Gleisstopfen mittels Krampen) statt, so kamen um ca. 1950 zusehends Verdichtungsgeräte mit dynamischer Anregung (mittels Unwuchterreger oder Exzenter) zum Einsatz.

Die Effizienz der Verdichtung wurde durch die dynamische Anregung signifikant erhöht, wobei die dynamische Bodenverdichtung jedoch vorerst auf rein empirischer Basis optimiert wurde. Eine neue Ära läutete das Patent von Geodynamik (Thurner & Sandström 1978) [1] ein, in dem ein Verdichtungsgerät (Vibrationswalze) erstmals mittels messtechnischer Instrumentierung gleichzeitig zu einem Messgerät wurde. Auch diese Methode basierte damals auf reiner Empirik. Dabei gab es in den Messungen immer wieder unerklärliche Phänomene, die fälschlicherweise als „Resonanzeffekte“ interpretiert wurden. In der Baupraxis konnte sich die Methode der prozessbegleitenden Verdichtungskontrolle durch die damit verbundenen Unsicherheiten anfangs nicht durchsetzen. Verschnell geweckte falsche Hoffnungen brachten die Methode zeitweise sogar in Misskredit. Erst systematische wissenschaftliche Untersuchungen (Messtechnik, Experiment, Theorie, Simulationsmodell) lieferten die notwendigen Erkenntnisse, um die „Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle“ (FDVK) praxistauglich



Abb. 1: Evolutionsstufen der Bodenverdichtung

zu machen [2, 3, 4]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die bereits empirisch optimierten Vibrationswalzen den Untergrund nicht – wie bislang angenommen – pulsierend belasten, sondern zyklisch den Kontakt verlieren und danach wieder auf den Untergrund aufschlagen. Erst das Verständnis und die Berücksichtigung dieser Kontaktbedingung führten zum theoretischen, experimentellen und praktischen Erfolg, sodass heute die FDVK im Erdbau eine gängige und normierte Praxis ist. Namhafte Walzenhersteller bieten daher auch unterschiedliche Messsysteme dafür an. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend, wurde sogar ein dynamisches Verdichtungsgerät (Vario-Walze mit Richtschwinger, BOMAG 1998) entwickelt, das sich selbsttätig auf die Untergrundeigenschaften einstellt, die dynamische Anregung stufenlos regelt und dadurch eine optimale Verdichtung erzielt.

In weiterer Folge wurden auch andere dynamische Verdichtungsgeräte und die Methode als solche wissenschaftlich untersucht. In beiden Fällen kam es regelmäßig zu einer zielgerichteten Weiterentwicklung und Verbesserung, wodurch die Effizienz nachweislich gesteigert werden konnte. Es folgten die dynamische Intensivverdichtung mittels Fallgewicht [5], die Oszillationswalzen [6, 7, 8], die Rüttelplatte und die Rüttelbohle [9] sowie der Tiefenrüttler [10, 11]. Bei den Stopfmaschinen für den Gleisschotter gibt es ebenfalls grundlegende Untersuchungen [12]. Prozessparameter sowie daraus empirisch abgeleitete Kenngrößen werden schon seit Langem aufgezeichnet und zur Qualitätssicherung dokumentiert. Seit 2016 betreibt Plasser & Theurer eine ausgiebige Grundlagenforschung zu dieser Thematik, wobei zielgerichtet und systematisch die Schotterverdichtung durch die Stopfmaschine

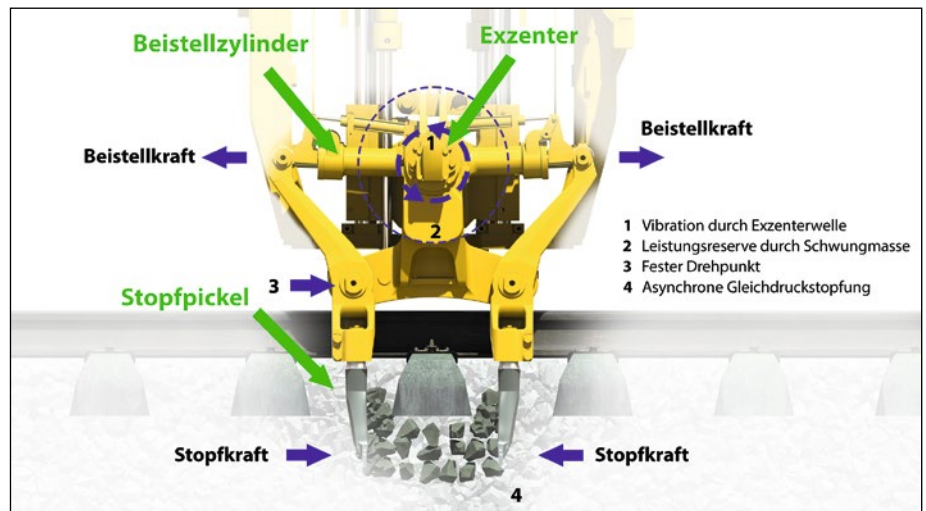


Abb. 2: Schematische Darstellung des wissenschaftlich optimierten Stopfaggregates

[13] und den nachlaufenden Dynamischen Gleisstabilisator [14] untersucht wird.

Optimierung der Gleisschotterverdichtung mittels Stopfmaschinen

Bei der Untersuchung der Verdichtung des Gleisschotters durch die Stopfpickel (Abb. 2) einer empirisch optimierten Stopfmaschine konnte erstmals messtechnisch und theoretisch nachgewiesen werden, dass es auch hier zu einem periodischen Kontaktverlust mit anschließendem schlagendem Kontaktgewinn zwischen dem Verdichtungsgerät (Stopfpickel) und dem zu verdichtenden Medium (Korngerüst des Gleisschotters) kommt. Dieser Vorgang ist bei den meisten erfolgreichen dynamischen Verdichtungsverfahren zu beobachten. Damit wird dem Gleisschotter nicht nur die Erregerfrequenz der dynamischen Stopfpickelanre-

gung (Exzenterrotation), sondern das gesamte Frequenzspektrum des periodischen Stoßes bei Kontaktgewinn aufgeprägt. In Kombination mit der vollständigen Entlastung bei periodischem Kontaktverlust kommt es, zumindest bei neuerem und nicht verschmutztem Gleisschotter, zum Vorgang des „Schotterfließens“. Dabei handelt es sich um eine temporäre dynamische Fluidisierung des Korngerüsts, gekennzeichnet dadurch, dass die Einzelkörner in dynamisch ständig wechselndem Kontakt zu den Nachbarkörnern „zu tanzen“ beginnen. Durch diese Interaktion „suchen“ die Einzelkörner gemeinsam eine kompaktere Lagerungsdichte. Kontinuumsmechanisch betrachtet, reagiert der Gleisschotter in diesem Zustand eher viskos, mit einer klassischen Bodenverflüssigung hat dieses beobachtete Phänomen allerdings nichts zu tun.

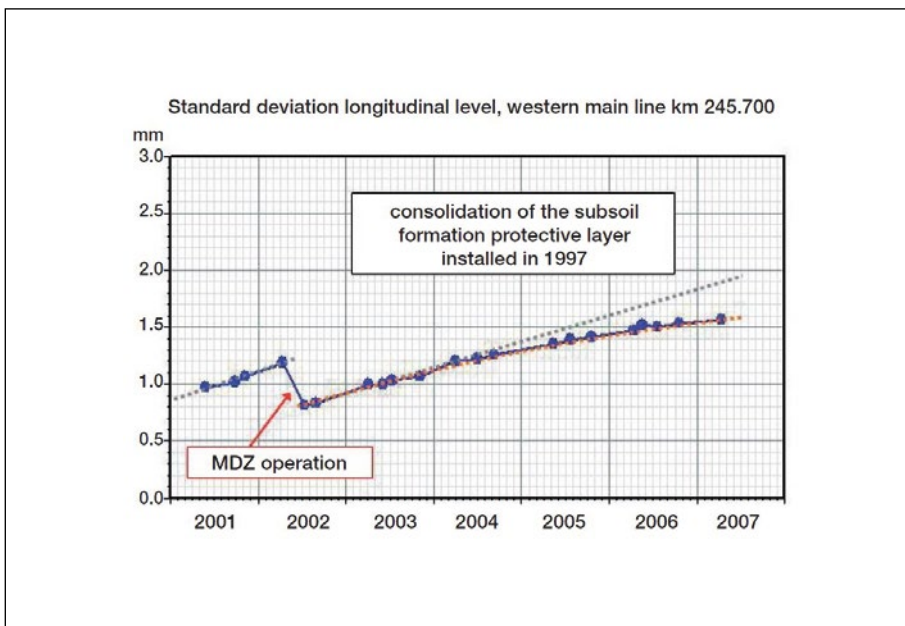


Abb. 3: Entwicklung der Gleislage über mehrere Jahre nach der Durcharbeitung mit einem exzenterbetriebenen Stopfaggregat

Durch eine permanente, gegebenenfalls pulsierende Auflast wäre dieser gewünschte Effekt jedoch unterbunden, weil den Körnern der erforderliche Freiraum fehlen würde. Dies zeigt sich auch bei anderen Verdichtungsmethoden wie z. B. dem Tiefenrüttler, bei dem es bei zu großem Spitzendruck zum „Überdrücken“ kommt. Dabei ist die Eindringgeschwindigkeit wesentlich langsamer, als wenn man der Korngerüst-Verdichtungsgerät-Interaktion ihren notwendigen Spielraum gewährt.

Konstruktionsbedingt führen die Stopfpickel der Stopfmaschinen von Plasser & Theurer eine durch die Rotation des Exzenters hervorgerufene weggesteuerte dynamische Bewegung (z. B. ± 5 mm) aus. Diese ist mit einer wählbaren stationären Beistellbewegung überlagert, bewirkt durch die hydraulischen Beistellzylinder (Abb. 2). Diese Bewegung dient dazu, den Gleisschotter unter die Schwelle zu transportieren. Im Leerlauf (Aggregat im angehobenen Zustand in der Luft) ist somit minimaler Energieaufwand erforderlich, da die Wirkung der dynamischen Brems- und Beschleunigungskräfte der Stopfpickel auf die Rotation der Exzenterinheit energieneutral ist. Durch die Rotationsträgheit der Exzenterinheit ist auch ausreichend kinetische Energie gespeichert, um kurzfristig besonders große Kräfte zu erzeugen, wenn diese (z. B. beim Eindringen in grob verschmutzten oder sogar verkitteten Gleisschotter) erforderlich werden. Diese gespeicherte Energie wirkt auch einem Abfall der Frequenz bei kurzfristigen Kraftspitzen entgegen.

Die weggesteuerte Pickelbewegung wird bei der regulären Schotterverdichtung nicht gewaltsam dem Gleisschotter aufgezwin-

gen, denn dies würde zu einer systematischen Kornertrümmerung führen. Durch den periodischen Kontaktverlust zwischen Stopfpickel und Gleisschotter wird dem Korngerüst nur ein Teil der Pickelbewegung aufgeprägt, und dieser lässt sich durch die variable Beistellbewegung maßgeblich beeinflussen. Trotz der konstanten weggesteuerten dynamischen Pickelbewegung findet somit ein feinfühliges Interaktionsprozess zwischen Pickel und Korngerüst statt. Dabei bleibt die Wegamplitude der dynamischen Schotteranregung den Gegebenheiten entsprechend anpassbar. Während der Verdichtung schlägt der Stopfpickel zyklisch auf die Grenzfläche zum fluidisierten Korngerüst, um dieses unter die angehobene Schwelle zu treiben. Die „Schotterwand“ in dieser Grenzfläche beginnt periodisch in sich zusammenzubrechen, wenn sich bei Kontaktverlust ein Spalt zum Stopfpickel auftut. Vom folgenden Schlag des nächsten Kontaktergebnisses wird sie jedoch wieder aufgefangen. Auf diese Weise „tanzen“ die Körner im fluidisierten Korngerüst weiter, bewegen sich in die gewollte Richtung und nehmen dabei eine wesentlich dichtere Lagerung ein als bei einer statischen Umlagerung. Trotz der weggesteuerten dynamischen Pickelbewegung sind daher die direkt am Pickel gemessenen Reaktionskräfte des fluidisierten Schotters deutlich geringer, als wenn man versuchen würde, den Schotter mittels statischer Beistellkraft oder lediglich pulsierender Beistellkraft unter die Schwelle zu befördern. Im Sinne der oben kurz beschriebenen Entwicklung der bautechnischen Verdichtungstechnik wäre in einer permanent wirkenden pulsierenden Pickelkraft eher eine Rückentwicklung zu erkennen.

Empirisch optimiertes Arbeitsergebnis

Wege und Irrwege

Plasser & Theurer arbeitet bereits seit 1953 an Lösungen für die Herstellung einer präzisen Gleislage unter robusten Rahmenbedingungen. Die durch Stopfmaschinen erzielte präzise Gleislage bildet die Grundlage für den Eisenbahnverkehr. Ein gutes Arbeitsergebnis wird mit Stopfmaschinen dann erzielt, wenn ausreichend Energie zur Kornumlagerung in das Schotterbett eingebracht wird und dessen Verdichtung im gestopften Bereich gleichmäßig hoch ist. Bereits 1953 wurde im Patent ÖP 184935 „Einrichtung bei Gleisstoppmaschinen“ (F. Plasser, J. Theurer) das Bodenverdichtungsprinzip der harmonischen Anregung mit Kontaktverlust im Bereich des Gleisbaus angewandt. Das darin beschriebene Prinzip kombiniert eine quasistarre (mechanische) Vibration mit einer hydraulisch aufgetragenen Beistellkraft. Moderne Stopfaggregate (Abb. 2) sind deutlich leistungsfähiger und präziser als ihre Vorgänger, arbeiten aber bis heute nach diesem bewährten Prinzip.

Aufgrund der in der Dissertation von Josef Fischer [12] ermittelten Arbeitsparameter ist es möglich, eine präzise, nachhaltige Gleislage zu erzeugen. Dies konnte bereits in Langzeitstudien [15] (Abb. 3) eindeutig belegt werden. Die vorwiegend verwendeten Parameter sind:

- 35 Hz Stopffrequenz
- Vibrationsamplitude (\pm) 4 bis 5 mm
- Verdichtdauer („Beistelldauer“): 0,8 Sekunden im Bereich der Instandhaltung, 1,2 Sekunden im Bereich von Gleisneulagen (zwei Verdichtungszyklen zu je 0,6 Sekunden).

Zu Forschungszwecken wurden im Laufe der Zeit immer wieder Versuche unternommen, das Verdichtprinzip der harmonischen Anregung ohne Kontaktverlust im Schottergleis zu untersuchen. Dabei wurde auf die Exzenterwelle verzichtet und mittels eines vollhydraulischen Antriebs eine harmonische Anregung realisiert. Der Vorteil des kurzzeitigen Kontaktverlusts musste dabei aufgegeben werden. Mit diesem Prinzip war es nicht möglich, eine präzise, nachhaltige Gleislage zu schaffen. Zudem konnten hohe energetische Hydraulikverluste festgestellt werden, die das System ineffizient machen.

Neuentwicklungen

Bei der Weiterentwicklung von Technologien bewährt sich das Prinzip „Neues entwickeln – Bewährtes verbessern“. Folgende Verbesserungen wurden in den letzten Jahren umgesetzt:

- Schlanke, mit Hartmetallpanzerung ausgestattete Stopfpickel erwiesen sich als deutlich langlebiger als ihre Vorgänger.
- Höhere Frequenz (45 Hz) während des Eintauchens der Stopfpickel in den Schotter erleichtert das Eindringen („Eindringhilfe“).

- Eine neue Entwicklung bei 2-Schwellen-Stopfaggregaten reduziert den Verschleiß an Pickeln und Schotter. Die Aggregate sind in Längsrichtung geteilt, sodass sie beim Stopfen leicht verzögert abgesenkt werden können.
 - Bei Stopfmaschinen mit Energiespeisung aus der Fahrleitung [16] kann der Vibrationsantrieb der Exzenterwelle mit einem kompakten, leistungsfähigen Elektromotor ausgestattet werden. Dadurch ergeben sich enorme Lärmvorteile [17, 18].
 - Ein neu entwickelter Drehwinkelgeber bildet die Basis für Condition Monitoring, sowohl für das Schotterbett als auch für das Stopfaggregat.
- Teil 2 des Beitrags lesen Sie in EI 3/21. ■

QUELLEN

- [1] Thurner, H. F.: Method and a device for ascertaining the degree of compaction of a bed of material with a vibratory compacting device, USPTO 1978
- [2] Kopf, F.: Großversuch zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle. Diplomarbeit; Technische Universität, Wien, 1993
- [3] Adam, D.: Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen. Dissertation; Technische Universität, Wien, 1996
- [4] Kröber, W.: Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden. Dissertation; Technische Universität, München, 1988
- [5] Paulmichl, I.; Kopf, F.; Adam, C.: Numerical simulation of the dynamic load plate test with the light falling weight device by means of the boundary element method // Structural dynamics - EURO DYN 2005. Proceedings of the 6th International Conference on Structural Dynamics, Paris, France, 4 - 7 September 2005; Millpress: Rotterdam, 2005, ISBN 9059660331

- [6] Kopf, F.: Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten. Dissertation; Technische Universität, Wien, 1999
- [7] Pistor, J.; Adam, D.: Dynamische Verdichtung und walzenintegrierte Verdichtungskontrolle mit Oszillationswalzen. Bauingenieur 09/2016, 337–349
- [8] Paulmichl, I.; Adam, C.; Adam, D.: Simulation of the stick slip motion of an oscillatory roller. Proc. Appl. Math. Mech. 2019, 19, doi:10.1002/pamm.201900245
- [9] Massarsch, K. R.: Deep Soil Compaction Using Vibratory Probes. In Deep Foundation Improvements: Design, Construction, and Testing; Esrig, M. I., Bachus, R. C., Eds.; ASTM International: 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1991; 297-297-23, ISBN 978-0-8031-1392-3
- [10] Fellin, W.: Empfehlungen zur Optimierung von Tiefenrüttlern, geotechnik 23 (2), 2000, 112–114
- [11] Nagy, P.: Rütteldruckverdichtung: dynamische Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung. Dissertation; Technische Universität, Wien, 2018



Dipl.-Ing. Dr. Florian Auer

Leiter Technologie und Innovation
Plasser & Theurer, AT-Wien
florian.auer@plassertheurer.com



PD Dipl.-Ing. Dr. techn. Fritz Kopf

Geotechnik
FDP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH,
AT-Wien
kopf@fcp.at

- [12] Fischer, J.: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter. Dissertation; Technische Universität, Graz, 1983
- [13] Barbir, O.; Pistor, J.; Kopf, F.; Adam, D.; Auer, F.; Antony, B.: Gleisstopfen: Modellierung der Stopfpickel Schotterbett Interaktion, geotechnik 42 (4), 2019, 219–228, doi:10.1002/gete.201900019
- [14] Feurig, S.; Stahl, W.; Freudenstein, S.; Antony, B.; Auer, F.: Vom Feld ins Labor – der Dynamische Gleisstabilisator auf dem Prüfstand, EI 05/2020, 17–20
- [15] Auer, F.; Zuzic, M.; Schilder, R.; Breyman, H.: 13 years of experience with rail-mounted formation rehabilitation on the Austrian network. RTR 2008, 29–36
- [16] Hauke, R.; Steinwenker, H.; Rebek, J.: E³ – elektrisierende Technologie für Gleisbaumaschinen, EI 12/2017, 18–21
- [17] Auer, F.; Pumberger, A.; Jodlbauer, G.: Lärmreduktion Stopfen – schalltechnische Vergleichsmessung, EI 03/2019, 16–9
- [18] Antony, B.; Auer, F.; Jodlbauer, G.; Pumberger, A.: Maschinenlärm lässt sich verringern, ZEVrail 2019, 446–451



Dipl.-Ing. Bernhard Antony

Leiter
Technologiezentrum Purkersdorf
Plasser & Theurer, AT-Wien
bernhard.antony@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwar

Forschung & Entwicklung
FDP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH,
AT-Wien
koczwar@fcp.at