

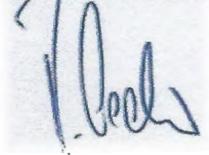
Projektdaten:

Projekttitel: Auslegung und Montage
gewindeformender
Schraubenverbindungen
Projektnummer: IGF 21202 BG
Laufzeit: 01.05.2020 – 30.06.2023
Berichtszeitraum: 01.05.2020 - 30.06.2023
Gesamtmittel Euro: 310.065,13
Forschungseinrichtung(en): TU Darmstadt – MPA-IfW
Grafenstraße 2
64283 Darmstadt
TU Dresden – FTM
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden
Leiter der Forschungseinrichtung: Prof. Dr. Matthias Oechsner (MPA-IfW)
Prof. Dr. Hans Christian Schmale (FTM)
Sachbearbeiter: M. Sc. Thomas Binder (MPA-IfW)
Dr.-Ing. Marcus Klein (MPA-IfW)
Dipl.- Ing. Anika Lamm (FTM)
Dr.-Ing. Volker Johné (FTM)

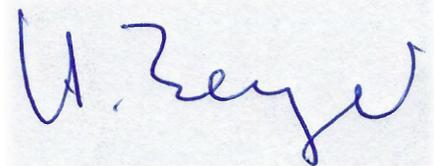
Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Thema	2
2 Problemstellung	2
3 Ziele	2
4 Vorgehensweise	2
5 Ergebnisse	4
6 Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit	5
7 Umsetzung und Ergebnistransfer	5
8 Dokumentation	9

Unterschrift Institutsleiter



Unterschrift Leiter des
PA



1 Thema

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Auslegung und das Montageverhalten gewindefurchender Schraubenverbindungen untersucht und Adaptionen der Rechenschritte nach VDI 2230-1 für gewindefurchende Schraubenverbindungen entwickelt. Die Untersuchungen stützen sich auf experimentelle Versuche, zur Bewertung des Einschraub- und Tragverhaltens sowie auf die numerische Simulation des Umform- und Montageprozesses. Das Gewindefurchen stellt im Rahmen der Direktverschraubung ein attraktives Fügeverfahren dar, um Bauteile dauerhaft und lösbar miteinander zu verbinden. Dabei ist das Verfahren durch ökonomische und mechanisch-technologische Vorteile charakterisiert.

2 Problemstellung

Bisher erfolgt die Auslegung gewindefurchender Schraubenverbindungen mittels experimenteller Einschraubversuche am Originalbauteil zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess. Dabei wird experimentell der sogenannte Schraubkanal (Differenz zwischen dem erforderlichen Einschraubdrehmoment und dem Überdrehmoment) ermittelt und das Zieldrehmoment auf 50% dieses Schraubkanals platziert. Für die Auslegung existiert bisher keine etablierte Richtlinie wie die VDI 2230-1 für ISO-metrische Schraubenverbindungen. Dies stellt insbesondere kleine und mittlere Unternehmen vor Herausforderungen, da die experimentelle Verifikation für die Abschätzung der Eigenschaften und des Verhaltens im Betrieb sehr zeit- und kostenaufwändig ist. Da gewindefurchende Schraubenverbindungen immer häufiger auch in sicherheitsrelevanten Systemen eingesetzt werden, müssen sowohl die Verbindung als auch die Einzelkomponenten funktions- und beanspruchungsgerecht ausgelegt werden.

3 Ziele

Das Hauptziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Adaption der Rechenschritte nach VDI 2230-1 für gewindefurchende Schraubenverbindung, sodass dem Anwender ein Werkzeug zur Verfügung gestellt wird, mit dem er Parameter im Rahmen der Auslegung wie der Einschraubtiefe oder der Größe des Vorlochs gezielt modifizieren und optimieren kann. Die adaptierten und erweiterten Berechnungsschritte schaffen die Grundlage zu einer effizienten Auslegung direktverschraubter Fügeverbindungen. Die Abgrenzung zur ISO-metrischen Verschraubung erfolgt durch die systematische Analyse spezifischer Unterschiede in der Schraubengeometrie und im Drehmomentverlauf. Auf Basis einer Grundcharakterisierung werden die mechanisch-technologischen Eigenschaften bestimmt. Abgeleitete Materialparameter für das elastisch-plastische Materialverhalten fließen unmittelbar in die Modellbildung im Rahmen der numerischen Simulation ein. Das Verhalten gewindefurchender Schraubenverbindungen wird sowohl experimentell als auch numerisch erfasst, sodass ein stetiger Austausch von Ergebnissen, beispielsweise Drehmomentverläufen und Mutterngewindegeometrie, stattfinden kann.

4 Vorgehensweise

Für die in *Abbildung 4-1* dargestellten Arbeitspakete wurden fünf Typenvertreter gewindefurchender Schrauben mit Nenndurchmesser $d = 6 \text{ mm}$ sowie ein ISO-metrisches Validierungselement (M6) ausgewählt. Als Bauteilwerkstoff wurde die Aluminium-Knetlegierung EN AW-6082 im Zustand T6 als Stangen- und Plattenmaterial verwendet.

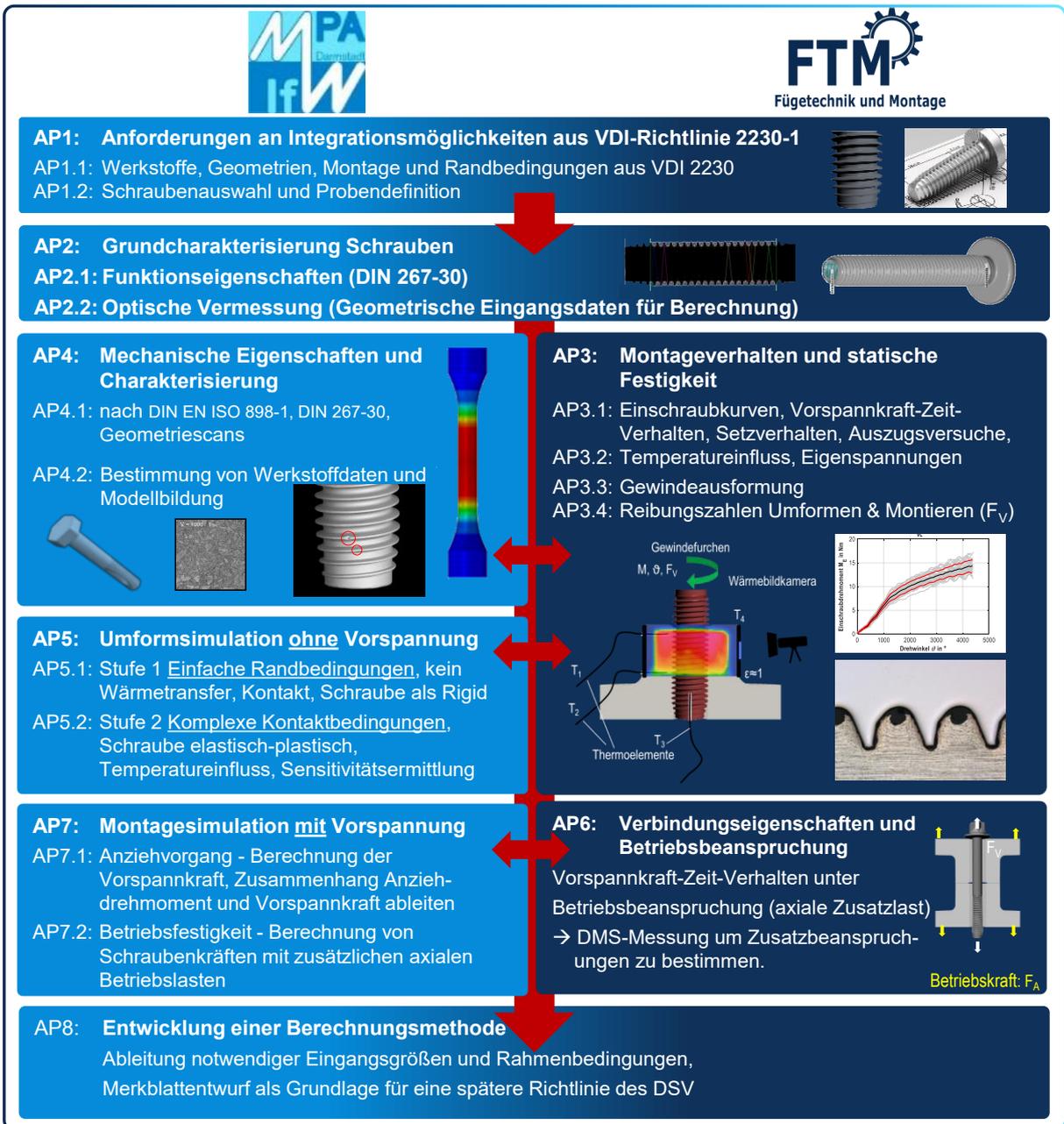


Abbildung 4-1: Bearbeitungskonzept

Das Werkstoffverhalten bei Raumtemperatur wurde in mechanisch-technologischen Prüfungen untersucht und Materialkennwerte für die numerische Simulation abgeleitet. Weitere Versuche dienen der Charakterisierung der Werkstoffproben entsprechend den Vorgaben der DIN EN ISO 898-1. Zudem wurde die Geometrie des durch Umformen erzeugten Muttergewindes in metallografischen Schliffbildern sowie mittels Computertomografie erfasst und bewertet. Das Montage- und Betriebsverhalten wurde analysiert, von besonderem Interesse war in diesem Zusammenhang die statische Festigkeit, der Einfluss von Temperatur und Eigenspannungen, die Ermittlung von Reibungszahlen und das Vorspannkraft-Zeit-Verhalten unter axialer Zusatzlast.

Parallel wurde der Montageprozess inklusive des Vorspannkraftaufbaus numerisch simuliert und die Wahl der Randbedingungen und Simulationsparameter als Einfluss auf das Ergebnis bewertet. Es wurde geprüft, inwiefern über eine Segmentierungsstrategie durch Erzeugung einer 45°-Segmentes rechenzeitoptimiert simuliert werden kann. Darüber hinaus wurde im Rahmen einer komplexen

Modellierung der Einfluss einer helixförmigen Vernetzung sowie des Temperaturtransfers zwischen Schraube und Mutter geprüft.

5 Ergebnisse

Das quasi-statische Versagensverhalten im Auszugversuch ist abhängig von der Einschraubtiefe und dem Vorlochdurchmesser. Die Varianten mit großen Vorlochdurchmessern (geringer Flankenüberdeckung) übertragen geringere Kräfte als Varianten mit kleinem Vorloch (große Flankenüberdeckung). Mit abnehmender Einschraubtiefe wird die auf den einzelnen Gewindezahn bezogene Last größer, wodurch der Versagensort nicht mehr im freien belasteten Gewinde, sondern im Muttergewinde festgestellt wurde. Bei diesem sequentiellen Versagen schert ein erster Gewindegang ab, weitere folgen im Anschluss. Die analytische Berechnung der Mindesteinschraubtiefe nach Rechenschritt R11 der Richtlinie VDI 2230-1 ergibt eine Abschätzung, die insbesondere für große Flankenüberdeckungen > 80% konservativ ist.

Die Temperaturmessungen zeigen bei allen untersuchten Varianten drei umlaufende Hotspots beim Gewindeformen, welche unabhängig von der Furchzone des jeweiligen Typenvertreterers ausgeprägt sind. Es wurden Temperaturen von ca. 80 °C ermittelt.

Die Berechnung von Reibungszahlen kann analog zur Vorgehensweise bei ISO-metrischen Schrauben für gewindefurchende Schrauben durchgeführt werden. Die spezifischen Geometrieparameter sowie das Zusatzmoment resultierend aus der elastischen, radialen Aufweitung des Vorlochs müssen dabei berücksichtigt werden.

Die geometrische Ausformung des Muttergewindes im Rahmen der durchgeführten Umformprozesssimulation in der Software Abaqus explicit ergab reduzierte Traganteile im Vergleich zum Experiment. Durchgeführte Parameterstudien mit Fokus auf Werkstoffmodellierung, Partitionierung, Reibungszahlen, Vernetzungsart, Massenskalierung, Elementgröße und adaptiver Neuvernetzung ergaben keine Verbesserung. Als Gründe wurden die Übertragung von Feldgrößen bei der adaptiven Neuvernetzung sowie der Kontaktdefinition zwischen Schrauben- und Muttergewinde angesehen. Die Arbeiten zur Entwicklung einer Vernetzungsstrategie zeigen die Grenzen der Umformprozesssimulationen auf und geben dem Anwender Handlungsempfehlungen für eine geeignete Vernetzungsstrategie.

Die Montagesimulation konnte im Anschluss an den Umformprozess unmittelbar nachgeschaltet werden. Es wurde ein Einfluss der Steifigkeit der Kopfauflage und der Kopfreibungszahl auf den resultierenden Vorspannkraft- und Drehmomentverlauf festgestellt. Reduzierte Kopfreibungszahlen verringern den Drehmoment-Drehwinkel-Gradient, höhere Steifigkeiten der Kopfauflage haben einen geringeren Vorspannkraft-Drehwinkel-Gradienten zur Folge. Für ein tiefergehendes Verständnis des Kontaktes zwischen Schrauben- und Muttergewinde wurde das Schraubengewinde in Bereiche eingeteilt, sodass das resultierende Drehmoment aus Normal- und Schubspannungen im Detail analysiert werden konnte.

Die systematische Vorgehensweise zur Berechnung von Schraubenverbindungen konnte für gewindefurchende Schraubenverbindungen erweitert werden, sodass charakteristische Merkmale im Rahmen der Rechenschritte R3 bis R7, R11 und R13 berücksichtigt werden konnten.

6 Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit

Die erweiterten Rechenschritte nach VDI 2230-1 für gewindefurchende Schraubenverbindungen berücksichtigen charakteristische Merkmale wie dem Vorlochdurchmesser, der Einschraubtiefe, der Gewindegeometrie und der elastischen radialen Vorlochaufweitung und geben über den bisherigen Stand

der Forschung hinaus Hinweise für eine verbesserte Auslegung der Fügeverbindung. Der Anwender kann gezielt Eigenschaften gewindefurchender Schraubenverbindungen modifizieren und optimieren. Für die untersuchten Varianten können die Anwendungsgrenzen aufgezeigt werden, was im Rahmen der konstruktiven Auslegung vom Konstrukteur und Anwender berücksichtigt werden kann. Die Berechnung erfolgt dabei in Anlehnung an die Rechenschritte der VDI 2230-1, wobei die im Vergleich zur ISO-metrischen Verschraubung modifizierenden Rechenschritte gekennzeichnet sind und die Parameter explizit markiert sind. Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für weitere Adaptionen bzw. Erweiterungen der Rechenschritte nach VDI 2230-1, um langfristig einen Einsatz in der Industrie zu ermöglichen. Dazu ist die Übertragbarkeit auf andere Werkstoffe sowie der Größeneinfluss im Rahmen weiterführender Forschung im Detail zu prüfen.

7 Umsetzung und Ergebnistransfer

Der Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft erfolgte zum Teil bereits während der Projektlaufzeit, noch nicht abgeschlossene Maßnahmen wurden entsprechend terminlich eingeplant.

In Tabelle 7-1 sind die Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft während des Projektes dargestellt.

Tabelle 7-1: Ergebnistransfer in die Wirtschaft während des Projektes

Maßnahme	Anz.	Ziel	Ort/Rahmen	Datum
Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses (pbA)	7	Vorstellung und Diskussion des Forschungsvorhabens und der Zwischenergebnisse, weiteres Vorgehen:		
		Kick-Off (17 Teilnehmer: 8 Firmen, 1 Verband, 2 FS)	Web-Meeting	29.07.20
		1. PbA (24 Teilnehmer, 14 Firmen, 2 FS)	Web-Meeting	13.01.21
		2. PbA (23 Teilnehmer: 13 Firmen, 2 FS)	Web-Meeting	28.04.21
		3. PbA (19 Teilnehmer, 5 Firmen, 2 FS)	Web-Meeting	01.03.22
		4. PbA (18 Teilnehmer, 11 Firmen, 2 FS)	Web-Meeting	08.09.22
		5. PbA (15 Teilnehmer, 9 Firmen, 2 FS)	MPA-IfW Darmstadt	21.02.23
		6. PbA (16 Teilnehmer, 5 Firmen, 2 FS)	FTM TU Dresden	26.06.23
Forschungsreport	3	Berichterstattung über Projektfortschritt, Verbreiten der Zwischenberichte (ZV) und Jahresberichte	Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. FSV	jährlich (im 3. Quartal) 31.08.21 31.08.22

Maßnahme	Anz.	Ziel	Ort/Rahmen	Datum
Sitzungen des AK Gemeinschaftsforschung des DSV	14	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt: AK „Gemeinschaftsforschung“ 130. UA „Schraubmontage“ DSV-Mitgliederversammlung Technischer Ausschuss AK „Gemeinschaftsforschung“ Technischer Ausschuss AK „Gemeinschaftsforschung“ Technischer Ausschuss DSV-Mitgliederversammlung AK „Gemeinschaftsforschung“ Technischer Ausschuss 135. AK „Schraubmontage“ 136. AK „Schraubmontage“ AK „Gemeinschaftsforschung“	Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Hösbach Web-Meeting Web-Meeting Web-Meeting Hösbach	21.09.20 12.11.20 26.06.20 26.11.20 19.04.21 25.11.21 04.04.22 22.01.22 24.06.22 17.10.22 24.11.22 21.04.22 06.09.22 27.03.23
Lehre		Wissenstransfer an Studierende	Bachelor- und Masterarbeiten	laufend
Publikation Internet		Vorstellung des Forschungsvorhabens	Homepage TU Darmstadt und TU Dresden	laufend, ab Projektstart
Fachtagungen und Konferenzen	9	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	HST: „Schraubtechnik Aktuell“ „Innovative Direktverbindungen – Auslegung, Berechenbarkeit und Potenziale“ Schraubfachausbildung (DSV) [®] Modul III Montage / Qualitätsmanagement 13. Informations- und Diskussionsveranstaltung Schraubenverbindungen Schraubfachausbildung (DSV) [®] Modul III Montage / Qualitätsmanagement 14. Workshop Industrielle Schraubmontage, Dresden	22.-23.09.20 27.03.21 23.06.21 30.10.21 02.04.22 21.06.22
Veröffentlichungen	1	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Fachzeitschriften z.B. Materialwiss. & Werkstofftechnik	MAWE 24.08.21

Maßnahme	Anz.	Ziel	Ort/Rahmen	Datum
Diplom-, Studien- und Projektarbeiten	3	Wissenstransfer an Studierende	Projektarbeit im Rahmen des Fachpraktikums, Ly Phuong Diem (Thema: Vereinheitlichung der Dimensionierung gewindeformen-der Schraubenverbindungen in Aluminium)	Abgabe: 30.06.21
			Bachelorthesis H. Ben Hamada (Thema: Validierung einer Bewertungsmethode zur Auslegung der Mindesteinschraubtiefe von gewindefurchenden Schraubenverbindungen)	07.03.22
			Bachelorthesis P. Reining (Entwicklung einer Vernetzungsstrategie im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse für den Prozess „Gewindefurchen“ zur Darstellung großer Umformgrade)	19.06.22

In Tabelle 7-2 sind die Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft nach Projektende dargestellt.

Tabelle 7-2: Ergebnistransfer in die Wirtschaft nach Projektende

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum
Fachtagungen und Konferenzen	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Schraubfachausbildung (DSV) [®] Modul III Montage / Qualitätsmanagement	29.09.23
		DSV Expertenforum „Innovationen im Leichtbau“	12.-14.09.23
Merkblatt	Merkblattentwurf als Grundlage für eine spätere DSV-Richtlinie für zielgruppenorientierten Ergebnistransfer	Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. FSV	nach Projektende
Abschlussbericht	Dokumentation der Projektergebnisse in öffentlich erhältlichen Dokumenten	Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. FSV	6 Monate nach Projektende

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum
Pub- likationen	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Fachzeitschriften Maschinenbau und Fügetechnik z. B. Konstruktionspraxis, Markt & Technik, K:Kompetenz für Konstrukteure	6 Monate nach Projektende
Berufliche Weiter- bildung	Vermittlung der Ergebnisse an Fachleute aus der Praxis	Schraubfachausbildung (DSV [®])	Jährliches Angebot
Homepage MPA-IfW TU Darmstadt	Zusammenfassung der Projektergebnisse	www.mpa-ifw.tu- darmstadt.de	4 Monate nach Projektende
Dissertation	Vertiefte wissenschaftliche Ver- wendung der Forschungs- ergebnisse	Promotionen an MPA-IfW und FTM	1 bis 2 Jahre nach Projektende

8 Dokumentation

Durchgeführte Arbeiten sowie die Präsentation von Forschungsergebnissen wurden in Form von Zwischenberichten der FSV sowie in Forschungsberichten dokumentiert. Zweimal jährlich wurden die Zwischenergebnisse in Form von Präsentationen im Rahmen des Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung kommuniziert. Es fanden insgesamt sechs Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie ein Kick-Off Meeting statt. Alle Sitzungen wurden dokumentiert und protokolliert und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt. Teilergebnisse wurden bereits veröffentlicht (13. Informations- und Diskussionsveranstaltung Schraubenverbindungen, 23.06.21). Informationen werden zudem im Internetauftritt der beteiligten Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt.

Die ausführliche Dokumentation der Forschungsergebnisse erfolgte in einem Abschlussbericht.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 21202 der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

Die Bearbeitung erfolgte durch das Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Oechsner sowie durch die Professur für Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. H.C. Schmale.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages