

Qualität und Montageprozesse im Fokus

Toleranzmanagement zur maßlichen Absicherung elektromechanischer Systeme und Gewährleistung der Prozessfähigkeit

Dipl.-Ing. Florian Weidenhiller, Technischer Leiter, Variation Systems Analysis GmbH, München,
fweidenhiller@vsa-ing.com

Kurzfassung

Prototypen, Nacharbeit und Angsttoleranzen sind Kostentreiber bei der Herstellung elektromechanischer Baugruppen, die Groß- und Kleinserien unnötig teuer machen und die Wertschöpfung komplexer Produkte reduzieren.

Elektromechanische Systeme sind durch hohe funktionale Ansprüche gekennzeichnet, wie z.B. das Radial- bzw. Axialspiel zwischen Stator und Rotor oder die Packungsdichte von Batterypacks. Diese qualitativen Kriterien werden sehr stark von Bauteilgeometrie, physikalischen Randbedingungen (Kräfte, Reibung, etc.), Zusammenbau in Montagevorgängen und Streuungen der Einzelteile beeinflusst.

Hinzu kommen im Bereich der Elektromobilität mit seinem großen Innovationspotential hohe Ansprüche an die neu zu entwickelnden Herstellungsanlagen. Häufig stehen heute noch bei der Anlagenentwicklung die eigentlichen Prozesse im Vordergrund, nicht aber die Prozessfähigkeit der darauf herzustellenden Produkte [1].

Der methodische Ansatz des Toleranzmanagements bietet hier Unterstützung in der Entscheidungsfindung. Beschrieben wird hierbei eine Vorgehensweise, wie qualitative Aspekte elektromechanischer Systeme unter Berücksichtigung der Einflüsse aus den Montageanlagen frühzeitig analysiert und optimiert werden können.

Ziel der methodischen Vorgehensweise ist es, sämtliche Randbedingungen hinsichtlich Montage und Qualität im frühen Stadium der Produktentstehung zu definieren, über den gesamten Prozess zu verwalten und allen Prozessbeteiligten zur Verfügung zu stellen.

Eine Bewertung dieser Randbedingungen erfolgt über die statistische Toleranzsimulation. Die verwendeten mathematischen Algorithmen ermöglichen eine Aussage darüber, welche maßliche Qualität (Streubreite) in den mechanischen Systemen zu erwarten ist. Des Weiteren werden die Verursacher dieser Streuungen ermittelt, und dadurch das gezielte Optimieren von Geometrie und Montageprozess (Anlagen) ermöglicht.

Abstract

Prototypes, rework and unnecessary tight tolerances (“Angsttoleranzen”) are cost drivers in the production of electro-mechanical assemblies. They result in unnecessary high costs in large-scale as well as limited lot production and reduce the added value of complex products.

High functional standards are the characteristics of electromechanical systems, e.g. radial-axial-gap between stator and rotor or the packing density of battery packs. Those qualitative criteria are strongly influenced by part geometry, physical boundary conditions (forces, friction, etc.), assembly orientation and single part variation.

In the area of electromobility with its great innovative potential, high demands are placed in the development of manufacturing facilities. It is nowadays very common to concentrate more on the actual process rather than the process capability of the manufactured product [1].

The methodical approach of Dimensional Management assists the decision-making process. It describes a procedure to early analyse and optimize qualitative aspects of electromechanical systems while considering impacts of manufacturing facilities.

The goal of the methodology is to define all aspects of assembly and quality in early concept stage, administrate them over the product development process and provide these aspects for all process participants.

The statistical tolerance simulation evaluates these boundary constraints. The used mathematical algorithms allow conclusions about the expected dimensional quality (range) in mechanical systems. In addition the contributors of the range are determined, thus allowing the specific optimization of part geometry and assembly process (manufacturing facility).

1 Die Firma Variation Systems Analysis GmbH

Die Variation Systems Analysis GmbH ist ein Engineering- und Softwareunternehmen, dass sich ausschließlich auf die Themen statistische Toleranzsimulation (2D, 3D), Toleranzmanagement sowie Vergabe von Form- und Lagetoleranzen spezialisiert hat - und das erfolgreich in Deutschland seit 1996.

Durch den zielgerichteten Einsatz der Methoden in Kombination mit numerischen Simulationswerkzeugen optimieren wir frühzeitig im Produktentstehungsprozess die maßliche Qualität von mechanischen Baugruppen.

Ziel dieser Vorgehensweise ist es

- den Einfluss **physikalischer Effekte** (Kräfte, Momente, etc.) sowie **Geometrie** und **Toleranzen** auf die maßliche Qualität zu untersuchen,
- Montagevorgänge und -anlagen prozesssicher zu gestalten,
- Nacharbeit und Ausschuss zu minimieren,
- „**Angsttoleranzen**“ bzw. „historisch gewachsene Toleranzen“ aufzuweiten und
- die Anzahl physikalischer Prototypen sowie Messaufwände zu reduzieren.

Schwerpunkt unseres Leistungsportfolios ist die Toleranzsimulation komplexer Produkte aus den Bereichen Automotive (Rohbau, Interior, Antrieb, Fahrwerk, RHT), Luftfahrt, Konsumgüter und Medizintechnik im Auftrag namhafter internationaler produzierender und entwickelnder Unternehmen.

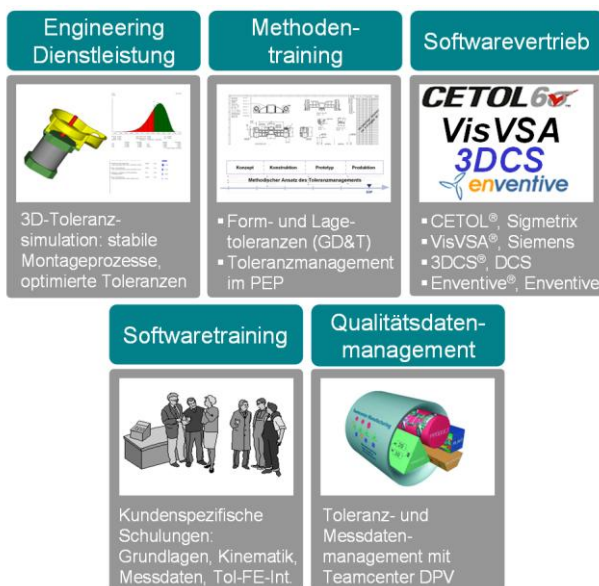


Bild 1 Leistungsportfolio der Variation Systems Analysis GmbH

Auf Grundlage unserer tiefgreifenden Erfahrungen aus den Bereichen Tolerierung und Anwendung statistischer Toleranzsoftware bieten wir unseren Kunden angepasste Beratungs- und Trainingslösungen für die von uns eingesetzten Methoden Toleranzmanagement und Vergabe von Form- und Lagetoleranzen (GDT – Geometric Dimensioning and Tolerancing) an.

Zusammen mit unserer Schwester TTC3 GmbH pflegen wir Partnerschaften mit den relevanten Herstellern statistischer 2D und 3D Toleranzsoftware. Diese Vertriebsrechte der Simulationssoftware geben uns jederzeit detaillierte Einblicke in die aktuellsten Trends und Entwicklungen auf dem Gebiet der statistischen Toleranzsimulation.

Dadurch können wir unsere Kunden systemneutral beraten, die optimale Lösung ermitteln und die Softwareeinführung durch produktspezifisches Softwaretraining und Support begleiten.

2 Methodischer Ansatz Toleranzmanagement

2.1 Warum Toleranzmanagement?

Das Toleranzmanagement beschreibt einen methodischen Ansatz, der in Kombination mit numerischen Simulationswerkzeugen in allen Stadien der Produktentwicklung Entscheidungen aus Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung hinsichtlich Montage und Qualität unterstützt.

In einer frühen Konzeptphase kann so die Bauteilgeometrie von mechanischen Baugruppen zielgerichtet hinsichtlich ihrer Prozessfähigkeit im späteren Verbau ausgelegt werden.

Die Auswirkung sämtlicher physikalischer Randbedingungen, die auf die mechanische Baugruppe wirken, lassen sich weiterhin ermitteln und die Geometrie dahingehend anpassen. Dies betrifft sowohl Einflüsse von Kräften und Momenten als auch Reibeffekte und Änderungen von Druck bzw. Temperatur.

In der Phase vorserien- bzw. seriennaher Entwicklung liegt der Fokus des Toleranzmanagements auf der Sicherstellung der Prozessfähigkeit von Montagevorgängen einhergehend mit der Reduzierung von Fertigungskosten. Dies wird erreicht durch eine klare Kontrolle von Einzelteiltoleranzen und Schließmaß-Streuungen sowie der Ableitung eines optimierten Messplanes.

Somit lassen sich durch den Einsatz des Toleranzmanagements Prototypen vermeiden, Anlaufzeiten und Anlaufzeiten reduzieren und unnötige Kosten durch Nacharbeit und Ausschuss vermeiden. Darüber hinaus unterstützt das Toleranzmanagement den

Konstrukteur bei der Auslegung von Montageanlagen und Fertigungshilfsmitteln, da deren Geometrie und Streuverhalten berücksichtigt werden.

Neben den o.g. monetären Aspekten einer Produktentwicklung bzw. Produktion fördert das Toleranzmanagement ein abteilungsübergreifendes Verständnis des Begriffes „Toleranzen“ sowie der Wechselwirkung von Streuungen, Geometrien und Montagevorgängen.

Gerade zwischen Entwicklung und Produktionsplanung kann es wegen der unterschiedlichen Arbeitsschwerpunkte zu Missverständnissen bzw. unterschiedlichen Gewichtungen bei Auswahl und Größenordnung von Toleranzen kommen.

So tendiert die Entwicklung häufig Aufgrund qualitativer Marktanforderungen hinsichtlich Funktion, Leistung und optischer Wahrnehmung dahingehend, in Schließmaßen und Einzelteiltoleranzen geringe Streuungen zu definieren.

Dieser Festlegung von geringen Streuungen steht aber häufig der Wunsch nach größeren Varianzen aus der Produktion gegenüber. Diese kann möglicherweise aufgrund der zur Verfügung stehenden Infrastruktur (Fertigungsmittel, Vorrichtungen, automatisierte Anlagen, Prozesswahl, etc.) bzw. Bedienerqualifikationen nur Streuungen in einer gewissen Bandbreite ohne Zusatzkosten (Nacharbeit, neue Maschinen, etc.) produzieren.

D.h. der Forderung nach kleinen Streubereichen aus der Entwicklung steht der Wunsch nach großen Varianzen aus der Produktion gegenüber.

2.2 Definition Toleranzmanagement

Die Lösung dieses Zielkonfliktes hat sich das Toleranzmanagement zur Aufgabe gemacht. Es sieht sich in seiner Tätigkeit und seinen Ergebnissen als Bindeglied zwischen Entwicklung und Produktion hinsichtlich aller auftretenden Fragestellungen rund um das Thema Toleranzen.

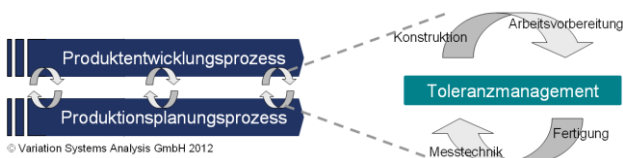


Bild 2 Toleranzmanagement als Bindeglied zwischen Entwicklung und Produktion

Fokus des methodischen und rechnergestützten Ansatzes ist die maßliche Qualität mechanischer Produkte sowohl in funktionaler als auch in optisch/haptischer Hinsicht. Ziel ist es, die geforderte Qualität zu Erfüllen und gleichzeitig toleranzbedingte Fertigungskosten zu

reduzieren, d.h. die Streuungen in Einzelteilen und Schließmaßen nur so genau wie nötig auszulegen. Durch die frühe Einbindung des Toleranzmanagements in die Produktentwicklung wird weiterhin sichergestellt, dass Geometrien und Montageprozesse im Sinne einer montagegerechten Konstruktion aufeinander abgestimmt sind [2].

Die Methodik erstreckt sich zeitlich über den gesamten Produktentstehungsprozess und bindet im Rahmen seiner Tätigkeiten alle Bereiche von Entwicklung und Produktion ein.

Aufgabe des Toleranzmanagements ist die

- Definition,
- Bewertung und
- Verwaltung

aller Informationen des Produktentwicklungsprozesses (PEP) hinsichtlich Montage und Qualität.

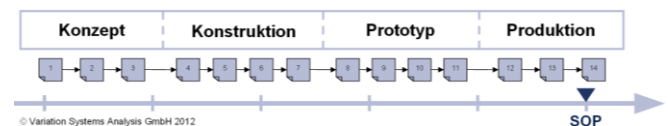


Bild 3 Toleranzmanagement im PEP

Die **Definition** dieser über den PEP verteilten Informationen erfolgt in enger Abstimmung mit den jeweils verantwortlichen Mitarbeitern.

Auf qualitativer Ebene werden die zu untersuchenden Qualitätsmerkmale des Produktes, z.B. Fugen, Versätze oder Winkligkeiten, bestimmt. Diese können sowohl für den Endkunden relevant sein (Funktion, Optik, Haptik, Leistung, etc.) also auch für interne Montagevorgänge. Ist z.B. der nominale Abstand zweier Bauteile gering, muss hier eine Fuge definiert werden um zu ermitteln, ob es unter Toleranzeinwirkung zu Kontakt und damit zu einer unbestimmten und nicht prozesssicheren Ausrichtung der Bauteile kommt [3].

Wichtig neben der Art und Lage der Messung ist auch die Wahl des Messmittels sowie die zur Bewertung des Herstellungsvorganges zulässige Abweichung des Qualitätsmerkmals.

Auf konstruktiver Ebene wird die Geometrie der mechanischen Baugruppe sowie die auf sie wirkenden physikalischen Randbedingungen (Kräfte, Momente, Temperatur, Reibung, etc.) aufgenommen.

Des Weiteren werden auf Einzelteilebene die Bezüge und funktional relevanten Bauteiltoleranzen (Form- und Lage – GD&T) ermittelt bzw. definiert [4].

Aus der Produktionstechnik wird ermittelt, wie sich Einzelteile und Baugruppen in der Montage bzw. im Betrieb aneinander ausrichten. So wird für jedes Bauteil und jeden Zusammenbau die Festlegung der 6 Freiheitsgrade (3 x Translation, 3 x Rotation) definiert

und festgehalten. Neben der Art der Ausrichtung wird auch der Zeitpunkt der Festlegung des Freiheitsgrades über die Fügefolge bestimmt.

In diesem Zusammenhang wird auch der Einfluss von Anlagen und Vorrichtungen aufgenommen. Wie Einzelteile besitzen diese Variation, die im Zusammenspiel mit Geometrie und Fügeprozess die Streuung im Schließmaß stark beeinflusst.

Nach Festlegung der o.g. Prozess- und Qualitätsparameter in Abstimmung mit den verantwortlichen Bereichen erfolgt deren **Bewertung** über die statistische Toleranzsimulation (Beschreibung s. u.). Dies erlaubt eine fundierte und systematische Optimierung aller eingehenden Parameter.

Ergebnis der statistischen Simulation sind auf die maßliche Qualität des Produktes abgestimmte

- Geometrie,
- Bezüge und Einzelteiltoleranzen,
- Anlagen und Vorrichtungen,
- optimierte Messpläne.

Schließlich ist das Toleranzmanagement noch verantwortlich für die **Verwaltung** der Montage- und Prozessparameter über den PEP unter Zuhilfenahme der vorliegenden PDM-Infrastruktur.

Ziel hierbei ist es, die gesammelten und bewerteten Parameter und Ergebnisse einheitlich allen Prozessbeteiligten zur Verfügung zu stellen.

2.3 Statistische Toleranzsimulation als Werkzeug des Toleranzmanagements

Die über das Toleranzmanagement definierten konstruktiven und prozesstechnischen Parameter werden als Randbedingungen in die statistische Toleranzsimulation eingegeben. Die Simulation stellt so die Wechselwirkungen zwischen Geometrie, Toleranzen, Fügeprozessen und physikalischen Einflüssen her, ermittelt deren Auswirkung auf die maßlichen Qualitätsanforderungen des Produktes und erlaubt die statistische Bewertung.

2.3.1 Eingliederung Toleranzsimulation in den PEP

Die statistische Toleranzsimulation lässt sich mit unterschiedlichen Schwerpunkten sinnvoll über den gesamten PEP einsetzen.

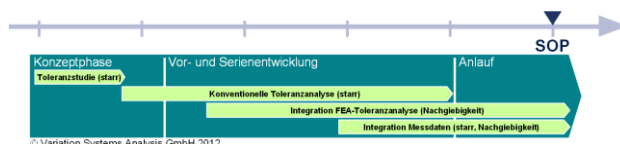


Bild 4 Statistische Toleranzsimulation im PEP

Bereits in einer frühen Konzeptphase können auf Basis von CAD-Vorgängern oder mittels abgeleiteter bzw. selbsterstellter 2D Funktionsgeometrie die ersten Toleranzstudien durchgeführt werden. Die Simulationen erfolgen hier auf Baugruppen bzw. Modulebene. Eine Betrachtung der Bauteile bis in die funktionale Tiefe erfolgt nur in ausgesuchten Bereichen.

Ziel hierbei ist es, sehr früh unter Berücksichtigung von äußeren physikalischen Einflüssen wie Kräften und Momenten gestalterisch Einfluss zu nehmen auf Konstruktion und Produktion.

So lassen sich die für Qualität und Montage optimalen Geometrien ableiten, kritische Bereiche frühzeitig ermitteln und Toleranzvorgaben bzw. Erfahrungen aus Vorgängerprojekten analysieren und bewerten.

In der Vor- bzw. Serienentwicklung setzt die statistische Toleranzsimulation dann auf frühe bzw. reife CAD-Modelle auf. Das Spektrum der Simulation bewegt sich von der Baugruppenebene aus der Konzeptphase in die funktionale Tiefe der Baugruppe, d.h. es werden alle funktional relevanten Bauteile simuliert.

Ziel dieser Phase der Simulation ist die Überprüfung alternativer Fügesequenzen, z.B. die Änderung einer Fügefolge bzw. das alternative Einbringen von Lehren und Vorrichtungen.

Des Weiteren lassen sich auf Basis der Simulationsergebnisse Anforderungen für die Genauigkeit von Werkzeugen (Spritzguss, Tiefziehen, etc.) ableiten, sowie konstruktive Änderungen an den Bauteilen implementieren.

Schließlich erlauben die Ergebnisse der statistischen Simulation noch Rückschlüsse auf den Einfluss der verwendeten Anlagen, unabhängig vom Automatisierungsgrad. Durch die Tolerierung der zur Bauteilorientierung verwendeten Anlageflächen bzw. Montagebolzen und -löcher lässt sich die Prozessfähigkeit der verwendeten Anlagen bestimmen und optimieren.

Mit zunehmendem Fortschritt der Entwicklung stehen Simulationsergebnisse aus anderen numerischen Verfahren (Kraft-Temperatur-FEM, etc.) zur Verfügung, die in Kombination mit der Toleranzsimulation ein noch genaueres Bild des Produktionsverfahrens und der zu erwartenden maßlichen Qualität geben können.

So besteht z.B. die Möglichkeit, durch Integration der Finite-Elemente Simulation in der statistischen 3D-Toleranzsimulation das Aufsprung- und Rücksprungverhalten überbestimmt verbauter, elastischer Bauteile (z.B. Blech- oder Kunststoffteile) zu bestimmen [5].

Weiterhin bieten Superpositionsverfahren die Möglichkeit, den Einfluss von Temperatur oder andere betriebsbedingte Abweichungen vom Nominalwert in Kombination mit Toleranz- und Geometrieeffekten abzubilden.

Schließlich unterstützt die statistische Toleranzsimulation noch den Serienanlauf bzw. die laufende Serie. Vorliegende Messprotokolle von Einzelteilen lassen sich mit der statistischen Toleranzsimulation verlinken. So werden die sich aus der Messcharge ergebenden Streuungen und die Nominalversätze eingelesen, und deren Einflüsse auf die Qualitätsmerkmale simuliert. Dadurch lassen sich zeitnah Optimierungsmaßnahmen zur Prozessstabilisierung ableiten. So lassen sich mit dieser Messdatenintegration Rückschlüsse ziehen, wo Anlangen mit welchem Wert nachgestellt werden müssen um Nominalversätze im Qualitätsmerkmal auszugleichen. Sollten Werkzeugänderungen nötig sein liefert die Einbindung von Messdaten Hinweise darüber, an welchen Stellen die Änderungen zu erfolgen haben. Eingriffe in die „Hardware“ von Produktionsanlagen werden so minimiert, eine Prozessstabilisierung schneller erreicht.

2.3.2 Prozessablauf der statistischen Toleranzsimulation

Die im Rahmen der Tätigkeiten des Toleranzmanagements ermittelten Montage- und Qualitätsparameter sind die Eingangswerte der statistischen Toleranzsimulation: Qualitätsmerkmale, Produkt, physikalische Randbedingungen und Montageprozess.



Bild 5 Prozessablauf statistische Toleranzsimulation

Prinzipiell ist die statistische Toleranzsimulation vorstellbar wie ein virtueller Arbeitsplatz. Für jedes Bauteil steht ein (virtueller) Schüttgutbehälter mit einer definierten Anzahl an Einzelteile zur Verfügung. Die Baugruppe wird nun virtuell nach der definierten Montagevorschrift (Festlegung der Freiheitsgrade, Fügefolge) zusammengebaut.

Die hinterlegten Algorithmen verarbeiten die eingegeben Toleranzwerte auf drei verschiedene Arten mit dem Ziel, fundierte Aussagen über die Streuung im Schließmaß, die Verursacher (Beitragsleister) der Streuung sowie den Einfluss von Nominalversätzen zu treffen.

Bei der Monte-Carlo-Simulation variieren beim Zusammenbau alle Toleranzen der Baugruppe gleichzeitig und zufällig innerhalb der vorgegebenen Streugrenzen und gemäß der definierten Verteilung.

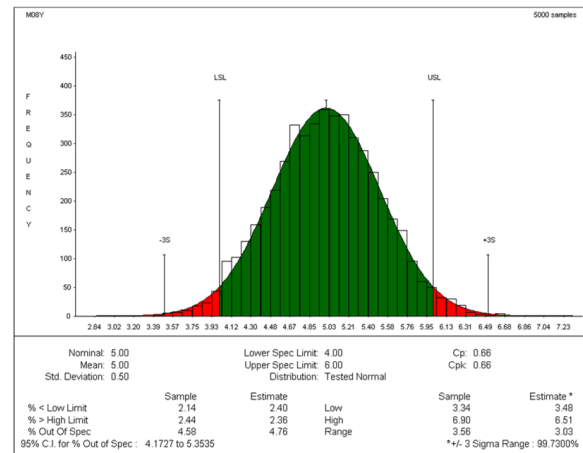


Bild 6 Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation

Das Ergebnis stellt sich als Verteilungskurve mit statistischen Kennzahlen dar, die Aussagen über die Streuung und damit die zu erwartende Qualität im Schließmaß zulassen. In Kombination mit den vom Anwender vorgegeben zulässigen Abweichungen ergeben sich Prozessfähigkeitskennwerte (cp, cpk) sowie prozentuale Ausschuss- bzw. Nacharbeitswerte [6].

Die zweite Simulation, die sog. Sensitivitätsanalyse oder High-Low-Median Simulation, verarbeitet die gleichen Randbedingungen mit einem anderen mathematischen Algorithmus.

Hier variiert nur eine Toleranz in der Baugruppe, und zwar zwischen ihren Extremlagen. Somit wird der Einfluss bestimmt, den eine Toleranz auf das Schließmaß ausübt.

Als Ergebnis ergibt sich eine Paretoverteilung, bei der die verursachenden Toleranzen der Einzelteile gemäß ihrer prozentualen Gewichtung aufgelistet werden. Zusätzlich erscheint die Sensitivität der beitragenden Toleranz, d.h. es wird der Faktor berechnet, mit dem die Toleranz aufgrund der geometrischen Verhältnisse im Schließmaß wirkt (z.B. Hebelwirkung durch Abstand zweier Löcher) [7].

Durch die eindeutige Darstellung und Gewichtung der Verursacher wird in einem ersten Schritt die zielgerichtete Optimierung des Zusammenbaus ermöglicht. Hier stehen dem Anwender alle Randbedingungen der Simulation zur Verfügung. D.h. eine Verringerung der Streubreite bzw. Ausschussquote wird nicht primär durch eine Reduzierung von Einzelteiltoleranzen erreicht, sondern z.B. durch konstruktive Anpassung oder

prozesstechnische Maßnahmen (Anpassung von Lehren und Anlagen, Änderung der Fügefolge oder Neubestimmung der Freiheitsgrade).

Contributors	Effective Tolerance	Sensitivity	Effect
1. pump - Plane → SPF [0.500]	0.9856	1.9712	2.71%
2. engine → Assembly Op.: asm op - alt_brk2	N/A	N/A	8.53%
3. alt_brk1 - Plane → SPF [0.500]	0.4897	0.9793	8.07%
4. block - Plane_1 → SPF [0.500]	0.4882	0.9764	8.02%
5. alt - Plane → SPF [0.500]	0.4332	0.8663	6.32%
6. block - Plane_2 → SPF [0.500]	0.3444	0.6887	3.99%
7. engine → Assembly Op.: asm op - pump_asm	N/A	N/A	3.97%
8. engine → Assembly Op.: asm op - alt_brk1	N/A	N/A	3.92%
9. alt_brk2 - Plane_1 → SPF [0.700]	0.3382	0.6763	3.85%

Qualität optimieren

Kosten reduzieren

Bild 7 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Durch die im Simulationsmodell durchgeführten Änderungen von Geometrie und Montageprozess reduziert sich schrittweise die Streuung bis eine akzeptable Prozessfähigkeit im Schließmaß erreicht wird. Ist diese erreicht kann der Beitragsleisterbericht hinsichtlich unnötig kleiner, und damit ggfs. kostenintensiver Toleranzwerte analysiert werden. Die Aufweitung einer Streuung im niedrigen einstelligen Prozentbereich hat i.d.R. keine messbaren Auswirkungen auf die Streuung im Qualitätsmerkmal.

Somit lässt sich auf Basis der Sensitivitätsanalyse die maßliche Qualität optimieren und die Fertigungskosten für Einzelteile durch zielgerichtete Aufweitung kleiner Toleranzen (sog. „Angsttoleranzen“ oder „historisch gewachsene Toleranzen“) reduzieren.

Die dritte Simulation untersucht den Einfluss von Nominalwertverschiebungen von Einzeltoleranzen auf das Qualitätsmerkmal.

Toleranzanalysen im frühen Stadium des PEP behandeln Toleranzen häufig als Bilateral, d.h. der Messpunkt eines Bauteils streut symmetrisch um den Nominalwert. Die Vermessung und statistische Auswertung einer Charge mit n Bauteilen ergibt für den gleichen Messpunkt i.d.R. eine Verschiebung des Nominalwertes und eine neue Streuung bzw. Verteilungsform.

Im Vorfeld der eigentlichen Simulation werden vorliegende Messprotokolle mit dem Modell verlinkt, die statistischen Werte eingelesen und die sich neu ergebenden Mittelwerte und Streuungen über die ursprünglichen symmetrisch verteilten Nominalwerte gelegt.

Bei der anschließenden Meanshift-Contributor Simulation wird der absolute Einfluss [mm] jeder einzelnen Mittelwertverschiebung auf das Schließmaß ermittelt.

Das Ergebnis zeigt Betrag und die Wirkrichtung aller Toleranzen einer Baugruppe mit hinterlegten Nominalwertabweichungen auf.

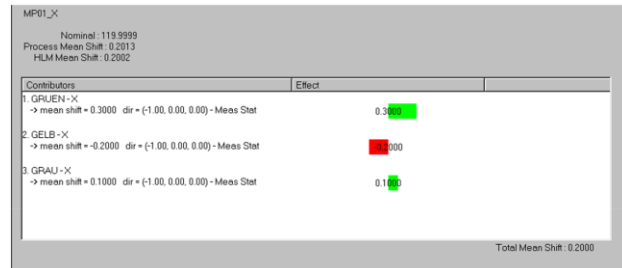


Bild 8 Ergebnisse der Meanshift-Contributor Simulation

Die Simulation zeigt somit das reale Bauteilverhalten und ermöglicht eine zielgerichtete Unterstützung bei der Prozessstabilisierung. So lassen sich z.B. aus den Nominalwertverschiebungen der Einzelteile Maßnahmen zur Verstellung von Anlagen und Vorrichtungen ableiten. Oder es lassen sich Werkzeugänderungen für Einzelteile vorab untersuchen, und so die kostengünstigsten Varianten ermitteln.

3 Toleranzmanagement elektromechanischer Systeme

Bei der Entwicklung neuartiger elektromechanischer Systeme in der Elektromobilität bietet der methodische Ansatz des Toleranzmanagements in Kombination mit statistischen Simulationswerkzeugen in vielen unterschiedlichen Bereichen Unterstützung bei der geometrischen Bauteilgestaltung, Definition von Montagevorgängen sowie Planung und Auslegung von Anlagen.

3.1 Funktionale Anforderungen elektromechanischer Systeme

Toleranzen wirken sich im komplexen Zusammenspiel von Montageprozessen und geometrischer Anordnung auf viele maßlich relevante Bereiche elektromechanischer Systeme aus.

Einfachere Untersuchungen ergeben sich beim Zusammenbau von Gehäuseteilen. Hier wird untersucht, wie Gehäuseteile sich aneinander ausrichten, ob es zu Kollisionen im Zusammenbau kommen kann und wie die Anschlussmaße der vollständigen Baugruppe zu den Anschlussbauteilen der Umgebung streuen. Häufig ist eine Bewertung von einfachen, eindimensionalen Toleranzketten mittels statistischer Addierung der beteiligten Streuungen in Tabellenkalkulationsprogrammen ausreichend.

#	Beschreibung Toleranzkette	Dim	LR	Nominal	Untergrenze	Obergrenze	Sensitivität	Streuereich	Mittelwert	Mittelwert verschiebung	Std. Verschiebung	Beitragsgewicht Min. Verschieb.	Beitragsgewicht Streuung
11	Antriebsflache 2	mm	2	5,000	-0,200	0,150	1,000	0,090	4,825	-0,175	0,009	20%	9,00%
12	Lagerbohle	mm	2	1,95,000	-0,100	0,000	1,000	0,100	344,660	-0,050	0,017	4%	36,50%
13	Antriebsflache 2	mm	2	5,000	-0,200	0,150	1,000	0,090	4,825	-0,175	0,009	20%	9,00%
14	Antriebsflachengebiet	mm	2	17,500	-0,100	0,000	1,000	0,100	18,990	-0,050	0,017	4%	36,50%
15	Antriebsflache 3	mm	2	12,000	-0,200	0,150	1,000	0,090	11,825	-0,175	0,009	20%	9,00%
16							1,000						
17							1,000						
18							1,000						
19							1,000						
20							1,000						
21							1,000						
22							1,000						
23							1,000						
24							1,000						
25							1,000						
26							1,000						
27							1,000						
28							1,000						
29							1,000						
30							1,000						
31							1,000						
32							1,000						
33							1,000						
34							1,000						
35							1,000						
36							1,000						
37							1,000						
38							1,000						
39							1,000						
40							1,000						
41							1,000						
42							1,000						
43							1,000						
44							1,000						
45							1,000						
46							1,000						
47							1,000						
48							1,000						
49							1,000						
50							1,000						
51							1,000						
52							1,000						
53							1,000						
54							1,000						
55							1,000						
56							1,000						
57							1,000						
58							1,000						
59							1,000						
60							1,000						
61							1,000						
62							1,000						
63							1,000						
64							1,000						
65							1,000						
66							1,000						
67							1,000						
68							1,000						
69							1,000						
70							1,000						
71							1,000						
72							1,000						
73							1,000						
74							1,000						
75							1,000						
76							1,000						
77							1,000						
78							1,000						
79							1,000						
80							1,000						
81							1,000						
82							1,000						
83							1,000						
84							1,000						
85							1,000						
86							1,000						
87							1,000						
88							1,000						
89							1,000						
90							1,000						
91							1,000						
92							1,000						
93							1,000						
94							1,000						
95							1,000						
96							1,000						
97							1,000						
98							1,000						
99							1,000						
100							1,000						
101							1,000						
102							1,000						
103							1,000						
104							1,000						
105							1,000						
106							1,000						
107							1,000						
108							1,000						
109							1,000						
110							1,000						
111							1,000						
112							1,000						
113							1,000						
114							1,000						
115							1,000						
116							1,000						
117							1,000						
118							1,000						
119							1,000						
120							1,000						
121							1,000						
122							1,000						
123							1,000						
124							1,000						
125							1,000						
126							1,000						
127							1,000						
128							1,000						
129							1,000						
130							1,000						
131							1,000						
132							1,000						
133							1,000						
134							1,000						
135							1,000						
136							1,000						
137							1,000						
138							1,000						
139							1,000						
140							1,000						
141							1,000						
142							1,000						
143							1,000						
144							1,000						
145							1,000						
146							1,000						
147							1,000						
148							1,000						
149							1,000						
150							1,000						
151							1,000						
152							1,000						
153							1,000						
154							1,000						
155							1,000						
156							1,000						
157							1,000						
158							1,000						
159							1,000						
160							1,000						
161							1,000						
162							1,000						
163							1,000						
164							1,000						
165							1,000						
166							1,000						
167							1,000						
168							1,000						
169							1,000						
170							1,000						
171							1,000						
172							1,000						
173							1,000						
174							1,000						
175							1,000						

Beeinflusst wird diese durch eine Toleranzkette, die sich vom Gehäuse über die Lagerstellen zur Welle mit Läufer, Magnet und Bandage erstreckt. Das geringe Montagespiel trägt über die geometrische Verkipfung im erhöhten Maße zur Streuung bei. Die Baugruppe Welle mit Läuferpaket wird ggfs. noch als Zusammenbau nachgearbeitet um die Genauigkeit zu erhöhen.

Beispiele für qualitative Anforderungen von Batterien finden sich in den Bereichen Ableiterlöcher, Kühlplatte und Akkukassette.

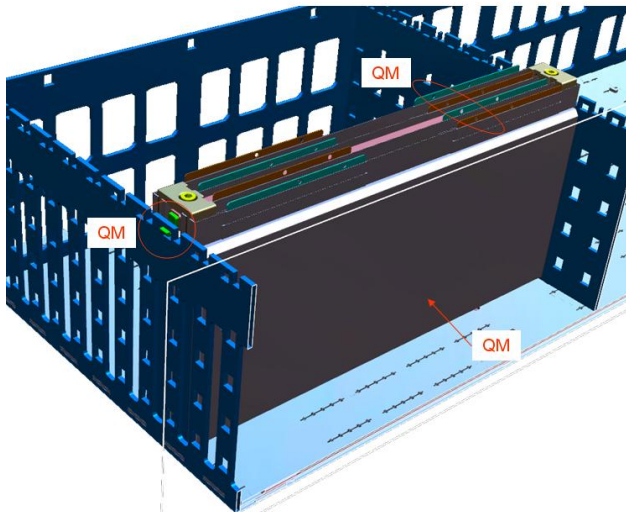


Bild 13 Funktionale Qualitätsmerkmale (QM) Batterie

So müssen die Ableiterlöcher der Akkukassette zueinander sowie zu benachbarten Kassetten fluchten. Zu hohe Streuungen in diesem Bereich können aber i.d.R. noch durch die Flexibilität des Flansches ausgeglichen werden.

Die Aufhängung der Kassette über den Haken zur Kühlplatte sieht ein Spiel vor, um den Montagevorgang zu gewährleisten. Kommt es hier zu Berührungen ist eine eindeutige, prozesssichere Ausrichtung nicht mehr zu gewährleisten.

Die Streuungen in den Qualitätsmerkmalen werden durch Einzelteiltoleranzen beeinflusst, die über die 3-dimensionale Geometrie bzw. den Ausrichtvorgängen noch verstärkt werden und in allen Raumrichtungen wirken.

Untersucht wird an dieser Stelle auch, ob die verwendeten Anlagen die Bauteile eindeutig und kollisionsfrei in das Gehäuse einführen können.

3.2 Überlagerung thermischer Effekten

Im Betrieb der Batterie muss ein Luftspalt zwischen den Akkukassetten gewährleistet sein.

Dieser wird zum einem durch Einzelteiltoleranzen, Bauteilgeometrien und Ausrichtung im Montageprozess definiert.

Im Betrieb kommt es allerdings durch thermische Effekte zu einer Ausdehnung der Materialien, und damit zu einer Verringerung des Luftspaltes.

Zur genaueren Abschätzung dieses Effektes können die Ergebnisse der undeformierten statistischen 3D-Toleranzsimulation mit den Temperaturendehnungen überlagert werden.

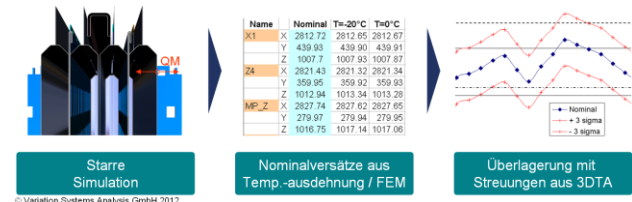


Bild 14 Überlagerung von thermischen Effekten

Ermittelt werden die Abweichungen vom Nominalwert in den Einzelteilen durch thermische Finite-Elemente-Simulationen. Diese werden in das Toleranzsimulationsmodell eingelesen. Der Zusammenbau aller Einzelteile zur Baugruppe erfolgt nun mit den Nominalversatzinformationen, d.h. in der Fuge stellt sich, in Abhängigkeit des Temperaturzustandes, ein neuer nominaler Wert im Qualitätsmerkmal ein. Da die Effekte aus Einzelteiltoleranzen, Fügevorgängen und Anlagenstreuungen auch in den temperaturbehafteten Zuständen wirken, streut das Qualitätsmerkmal um den neuen nominal Wert mit der bereits ermittelten Streubreite.

Bei Betrachtungen unterschiedlicher Temperaturen stellt sich für jeden Zustand ein neuer Nominalwert ein, um den die ermittelte Streuung wirkt.

Darstellbar ist der nominale Verlauf des Qualitätsmerkmals über die Temperaturänderung mit einem „einhüllenden“ Streuband.

3.3 Ableitung von Messplänen und Kostenpotentialerschließung

Über die Ergebnisse der statistischen Toleranzsimulation (Streuungen, Beitragsleister) werden Verbesserungen von Geometrien, Bezügen und Toleranzen, Fügeprozessen und Montageanlagen abgeleitet.

Nach Abschluss der Simulation können anhand der Simulationsergebnisse noch optimierte Messpläne abgeleitet sowie Kostenpotentiale bei der Einzelteilmontage erschlossen werden.

Neben einzelnen Qualitätsmerkmalen lassen sich auch Gruppen von Schließmaßen hinsichtlich der Beitragsleister zusammenfassen und auswerten. Dargestellt wird dann, mit wie viel Prozent eine Toleranz auf eine Anzahl n von Messungen wirkt.

Node Reported: M01-M0x		Feature KCC Summary (Patterns expanded)	
Contributors	Effect		
ZB_AGA_VST LOC - ROT_Z_TOL_ANGENOMMEN SPF 6,000 KRUENMER			18.01%
TAR_ZB_ATL - Z SPF 2,000 A B C KRUENMER			17.51%
TAR_ZB_ATL - RAD Size: Min: -0,400 Max: 0,400; POS Dia 1,400 A...			8.81%
ZB_AGA_VST LOC - ROT_XY_TOL_ANGENOMMEN Size: Min: -0,100 Max: 0,100; POS 6,000 HALTER_ATL			8.71%
LOC - Y2 SPF 0,600 HALTER_ATL			8.52%
LOC - Y3 SPF 0,600			5.39%

Bild 15 Hauptbeitragsleister gruppierter Qualitätsmerkmale (Beispiel)

Über die gesamte Baugruppe betrachtet werden somit die Toleranzen identifiziert, die deren messbare Qualität hauptsächlich beeinflussen.

Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für einen optimierten Messplan der Einzelteile, in dem v.a. die maßbestimmenden Toleranzen Eingang finden. Werte mit geringem oder nicht relevantem Einfluss werden hier nicht berücksichtigt. Dadurch lassen sich die durchzuführenden Messaufwände auf die maßlich relevanten Werte reduzieren.

Das gleiche Ergebnis umgekehrt betrachtet stellt die Toleranzen der Gruppe von Schließmaßen dar, die global betrachtet keinen oder nur geringen Einfluss auf die jeweiligen Streuungen ausüben.

Node Reported: M01-M0x		Feature Non-Candidate Summary (Patterns expanded)	
Contributors	Effect		
KURBEL_GEH TAR_ZKORF - Y4X6 POS Dia 0,015 A B C KURBEL_GEH			0.00%
TAR_HLT_AGA_MI - X SPF 0,400 A B C KURBEL_GEH			0.00%
TAR_ZKORF - Y5 POS Dia 0,015 A B C KRUENMER			0.00%
LOC - Z5 Size: Min: -0,100 Max: 0,100; POS 0,200 A B ZB_AGA_VST			0.00%
MP - M04_AX_Z SPF 0,099 UMGEBUNG			0.00%
MP - M04_AX_Z SPF 0,099 STEUER_GEH			0.00%
LOC - Y22_TOL_ANGENOMMEN Size: Min: -0,100 Max: 0,100; POS Dia 0,100 ZB_AGA_VST			0.00%
MP - M05_VD Size: Min: -0,100 Max: 0,100			0.01%

Bild 16 Beitragsleister gruppierter Qualitätsmerkmale mit geringem Effekt (Beispiel)

Eine anschließende Analyse einzelner Toleranzwerte dieser Liste ermöglicht die Identifizierung unnötig kleiner Einzelteiltoleranzen. Diese sind i.d.R. nicht mit einfachen, kostengünstigen Fertigungsverfahren herstellbar und erhöhen so die Herstellungskosten des Bauteils. Eine Aufweitung dieser Toleranz (nach Validierung über die Simulation) erschließt Kostenpotentiale bei der Fertigung von Einzelteilen.

4 Zusammenfassung

Der methodische Ansatz Toleranzmanagement definiert und verwaltet zielgerichtet und frühzeitig im Produktentstehungsprozess alle montage- und qualitätsbestimmenden Randbedingungen mechanischer Baugruppen.

Die statistische Toleranzsimulation (2D, 3D) als Werkzeug des Toleranzmanagements bewertet dieses Randbedingungen und stellt die Wechselwirkungen zwischen Geometrie, Toleranzen, Montagevorgängen und Anlagen dar.

Diese systematische Ermittlung bzw. Ableitung aller maßbestimmenden Randbedingungen elektromechanischer Baugruppen sowie deren Bewertung über statistische Simulationswerkzeuge erlauben eine fundierte und zielgerichtete Optimierung von Bauteilgeometrien, Bezügen und Toleranzen, Fügeprozessen und Montageanlagen.

Im Rahmen einer virtuellen Produktentwicklung stellt die statistische Tolerierung und Simulation von Prozessen somit ein Kernelement dar [8].

5 Literatur

- [1] Schamari, U. W.: Montagetechnik für Elektrofahrzeuge fordert innovative Entwickler heraus. VDI Nachrichten, Düsseldorf, 2011
- [2] Weidenhiller, F: Seminar: Einführung in das Toleranzmanagement, München, 2012
- [3] N.N.: VDA-Band 4: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz
- [4] Jorden, W.: Form- und Lagetoleranzen, München, Wien: Carl Hanser Verlag 2005
- [5] Liu, S.: Variation Simulation of Deformable Sheet Metal Assembly, Doctoral Thesis, Michigan: University of Michigan, 1995
- [6] N.N.: VDI 4008, Monte-Carlo-Simulation, Düsseldorf: VDI, 1999
- [7] Stockinger, A.: Computer Aided Robust Design – Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements, Dissertation Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, 2010
- [8] Klein, B.: Montagesimulation in der virtuellen Produktentwicklung, ATZ 101 Nr. 7/8, 1999